

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA DOSAGEM DO CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO UTILIZANDO POZOLANAS PROVENIENTES
DA CASCA DE ARROZ**

**TESE APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DARIO DE ARAÚJO DAFICO

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 2001

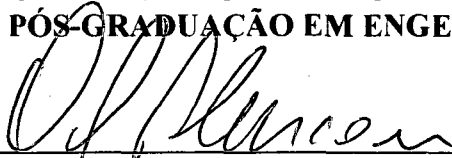
**ESTUDO DA DOSAGEM DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO UTILIZANDO
POZOLANAS PROVENIENTES DA CASCA DE ARROZ**

DARIO DE ARAÚJO DAFICO

ESTA TESE FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

DOUTOR EM ENGENHARIA

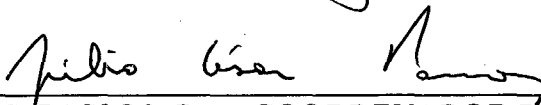
**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



ORESTES ESTEVAN ALARCON, Dr. - ORIENTADOR

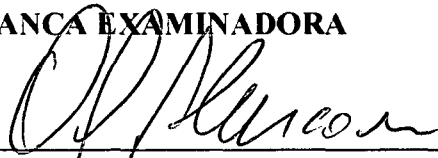


LUIZ ROBERTO PRUDÊNCIO JÚNIOR, Dr. - CO-ORIENTADOR

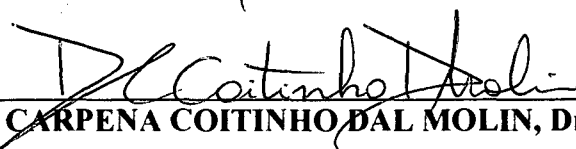


JÚLIO CESAR PASSOS, Dr. - COORDENADOR DO CURSO

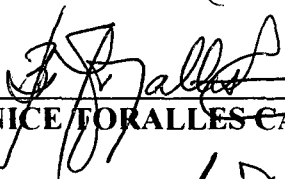
BANCA EXAMINADORA



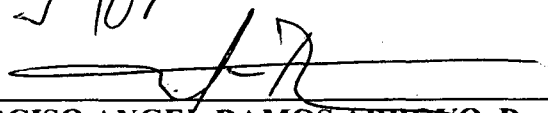
ORESTES ESTEVAN ALARCON, Dr. - PRESIDENTE



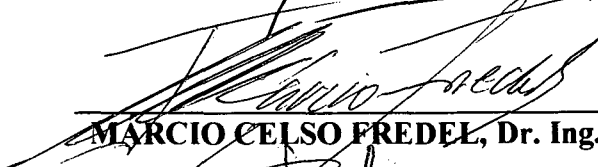
DENISE CARPENA COITINHO DAL MOLIN, Dr. - RELATOR



BERENICE TORALLES CARBONARI, Dr.



NARCISO ANGEL RAMOS ARROYO, Dr.



MARCIO CELSO FREDEL, Dr. Ing.



PHILIPPE JEAN PAUL GLEIZE, Dr. Ing.

Biografia do autor:

Dario de Araújo Dafico formou-se engenheiro civil pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás em 1985. Nos primeiros anos de carreira trabalhou como engenheiro responsável técnico em várias obras de edifícios verticais. Em 1993 obteve o grau de Especialista em Administração de Empresas pela Universidade Católica de Goiás. De 1992 a 1994 foi gerente técnico do Núcleo de Informação Tecnológica em Construção Civil, criado por convênio entre o IEL/FIEG e SEBRAE/GO. No início de 1994 ingressou como professor do Departamento de Engenharia da Universidade Católica de Goiás. Em 1997 obteve o título de Mestre em Engenharia Civil pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é Professor Adjunto da área de ciência dos materiais e materiais de construção da Universidade Católica de Goiás.

Aos meus pais José e Ana, que me ensinaram os primeiros passos e me deram o exemplo. E à minha esposa Adriana, que esteve ao meu lado durante toda a caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ter me dado a vida, boa saúde e vontade de realizar.

Ao meu pai José, que além de bom pai, sendo engenheiro e professor dedicado, tem sido o modelo por mim perseguido.

À minha mãe, que além de boa mãe, como minha primeira professora me proporcionou a base sólida para que pudesse caminhar com segurança.

À minha esposa Adriana que esteve sempre ao meu lado dando apoio e incentivo.

Agradeço à Capes que, através do Programa de Incentivo à Capacitação Docente, me concedeu a bolsa de estudos.

Agradeço à Universidade Católica de Goiás que me concedeu a licença do Departamento de Engenharia para os estudos de pós-graduação. Da UGC meus agradecimentos especiais :

- Da Reitoria, à Ex-Reitora Prof^ª Clélia Brandão;
- Da VPG, ao Prof^º Italiano Monini, ao Prof^º José Baldino, e à Sra. Dalva Coseco;
- Do Departamento de Engenharia, ao irmão e amigo Prof^º Alberto Dafico que me apoiou na saída para a pós-graduação e também me ajudou no desenvolvimento do software contido na tese. Ao também amigo de longa data, Prof^º Argemiro Mendonça, Ex-Diretor do Departamento, que não mediu esforços para que eu pudesse sair para a pós-graduação e sempre me deu imenso apoio em todas minhas solicitações. E a todos os colegas do Departamento que me apoiaram unanimemente no meu pedido de licença para o mestrado e depois para o doutorado.

Agradeço também à todos os professores, funcionários e colegas do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC e aos do POSMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, que sempre foram gentis e solícitos. Da Universidade Federal de Santa Catarina meus agradecimentos especiais:

- Ao amigo e orientador da tese, Prof^º Orestes, que acreditou na minha capacidade e não teve dúvidas em me aceitar como seu orientando.
- Ao amigo e co-orientador da tese, que foi meu orientador quando da minha dissertação de mestrado, Prof^º Luiz Prudêncio, que, de tanto, faltam palavras que expressem todo o meu agradecimento.
- Ao professor e amigo Narciso Arroyo, que abriu as portas do laboratório de combustão para o longo trabalho que lá foi realizado, e que tanto me ensinou com dedicação e entusiasmo pelo meu trabalho.
- Ao professor e amigo Márcio Fredel, professor dedicado, que além de muito ter me ensinado nas disciplinas formais, também me encorajou pelo modo sempre atencioso de tratamento pessoal.

SUMÁRIO

Lista de figuras.....	VI
Lista de tabelas.....	VIII
Notação e nomenclatura.....	X
Resumo.....	XI
Abstract.....	XII

INTRODUÇÃO.....	1
------------------------	----------

CAPÍTULO I

O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

1.1 O CONCRETO COMO MATERIAL PARA CONSTRUÇÃO.....	8
1.2 O CIMENTO PORTLAND.....	9
1.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRABALHABILIDADE – PRINCIPAIS PARÂMETROS PARA DOSAGEM DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.....	13
1.3.1 A resistência à compressão do concreto.....	13
1.3.2 A trabalhabilidade do concreto.....	15
1.4 ALGUNS FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	17
1.4.1 Fatores relacionados ao cimento.....	17
1.4.1.1 Composição química e mineralógica do cimento.....	17
1.4.1.2 Superfície específica do cimento.....	18
1.4.1.3 Adições minerais ao cimento.....	19
1.4.2 Fatores relacionados à produção do concreto.....	22
1.4.2.1 Porosidade da pasta hidratada.....	22
1.4.2.2 Agregados.....	26
1.4.3 Fatores externos à mistura (cura do concreto).....	28
1.4.3.1 Tempo e temperatura.....	28
1.4.3.2 Pressão.....	28
1.4.3.3 Umidade	29
1.5 O ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO CONVENCIONAL.....	29
1.5.1 Princípios fundamentais dos métodos de dosagem.....	29
1.5.2 O método de dosagem EPUSP/IPT.....	33
1.5.2.1 Introdução.....	33

1.5.2.2 Fundamentos básicos.....	33
1.5.2.3 Principais requisitos de projeto.....	35
1.5.2.4 Ensaios preliminares necessários.....	35
1.5.2.5 Etapas da dosagem.....	35

CAPÍTULO II

O CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

2.1 UM NOVO MATERIAL ESTRUTURAL.....	37
2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	41
2.2.1 Vantagens estruturais de um concreto com alta resistência.....	41
2.2.2 Limitações estruturais e de projeto.....	41
2.3 DURABILIDADE DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	43
2.3.1 Corrosão eletroquímica.....	43
2.3.2 Resistência ao congelamento.....	43
2.3.3 Resistência química.....	44
2.3.4 Resistência ao fogo.....	45
2.3.5 Resistência à abrasão.....	45
2.4 MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	45
2.4.1 Agregados.....	45
2.4.2 Cimento e adições minerais.....	46
2.4.3 Aditivos químicos.....	46
2.5 PRODUÇÃO, LANÇAMENTO E CURA DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	47
2.5.1 Produção.....	47
2.5.2 Trabalhabilidade e lançamento.....	48
2.5.3 Cura.....	49
2.6 ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	49
2.6.1 Introdução.....	49
2.6.2 Método de estudo de dosagem proposto por ADDIS & ALEXANDER.....	50
2.6.3 Método de estudo de dosagem proposto por MEHTA & AİTCIN.....	52
2.6.4 Método de estudo de dosagem proposto por DE LARRARD.....	55
2.6.5 Método de estudo de dosagem proposto por NAWY.....	58
2.6.6 Método de estudo de dosagem proposto por ISAIA.....	60

2.6.7 Algumas considerações sobre os métodos descritos e outros métodos de estudo de dosagem propostos recentemente.....64

CAPÍTULO III

MATERIAIS POZOLÂNICOS E SEU PAPEL NO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

3.1 A REAÇÃO POZOLÂNICA.....67

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS POZOLANAS..... 70

3.3 CINZA VOLANTE..... 71

3.4 SÍLICA ATIVA..... 73

3.5 CINZA DE CASCA DE ARROZ.....76

3.5.1 A cinza da casca de arroz como material pozolânico..... 76

3.5.2 Estado-da-arte no Brasil e no mundo da queima da casca de arroz para obtenção de pozolana para adição na produção de concreto.....79

3.5.3 O potencial econômico.....83

3.5.4 O que está faltando para dar impulso à utilização da cinza de casca de arroz no concreto.....84

3.6 EFEITO FILER, MICROFILER E A SINERGIA NA ADIÇÃO DE MAIS DE UMA POZOLANA NO CONCRETO..... 85

CAPÍTULO IV

ESTUDO EXPERIMENTAL DE PRODUÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ DE BAIXO TEOR DE CARBONO

4.1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS..... 89

4.2 EXPERIMENTOS COM O PROTÓTIPO DE FORNALHA PARA COMBUSTÃO EM LEITO FIXO..... 91

4.2.1 Descrição da fornalha e das hipóteses adotadas para realização das experiências..... 91

4.2.2 Combustão da casca de arroz com fluxo de ar invertido para produção de cinza branca.....96

4.2.3 Combustão de mistura de casca de arroz com cinza de casca de arroz proveniente de queima em leito fluidizado.....99

CAPÍTULO V

DOSAGEM DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO E COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES POZOLÂNICAS DAS CINZAS

5.1 INTRODUÇÃO..... 104

5.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARA OS CONCRETOS.....	105
5.3	DOSAGEM DE MISTURAS PARA CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	109
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES POZOLÂNICAS ENTRE AS CINZAS DE CASCA DE ARROZ E DESTAS EM RELAÇÃO ÀS OUTRAS POZOLANAS.....	114

CAPÍTULO VI

ESTUDO ESTATÍSTICO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO EM FUNÇÃO DOS VOLUMES DE MATERIAIS DA PASTA

6.1	REGRESSÃO MÚLTIPLA ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO, E DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS, EM FUNÇÃO DOS VOLUMES DE MATERIAIS DA PASTA.....	120
6.2	ESTUDO SIMILAR DE REGRESSÃO MÚLTIPLA ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO, E DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS, EM FUNÇÃO DOS VOLUMES DE MATERIAIS DA PASTA, UTILIZANDO DADOS DE OUTROS AUTORES.....	124

CAPÍTULO VII

PROPOSIÇÃO DE MÉTODO DE DOSAGEM ECONÔMICA DO CAD, A PARTIR DE DOSAGEM EXPERIMENTAL ALEATÓRIA, E OBSERVAÇÃO DE REQUISITOS DE RESISTÊNCIA E DURABILIDADE, AUXILIADO POR COMPUTADOR

7.1	INTRODUÇÃO.....	130
7.2	SEQUÊNCIA LÓGICA DO ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DE UMA MISTURA MAIS ECONÔMICA.....	131
7.3	SIMULAÇÃO DO USO DO SOFTWARE E COMPARAÇÃO COM OS DADOS USADOS PARA OS CÁLCULOS.....	135

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES, SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1	CONCLUSÕES.....	142
8.2	SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	143
8.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	144

ANEXO A..... 147

ANEXO B..... 157

ANEXO C..... 179

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....184

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$	10
Figura 2 – Micrografia em MEV/ES de pasta de cimento hidratada onde pode-se observar o gel de C-S-H, a porosidade e cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	11
Figura 3 - Ensaio de consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone.....	15
Figura 4 - Representação diagramática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto.....	21
Figura 5 - A porcentagem de água/materiais secos (H) é praticamente independente do traço para um mesmo abatimento.....	31
Figura 6 - Diagrama de dosagem do método EPUSP/IPT.....	34
Figura 7 – Exemplo de diagrama para escolha da melhor mistura.....	63
Figura 8 – Partícula de sílica ativa dissolvendo-se em uma solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	69
Figura 9 – Solubilidade de alguns óxidos e hidróxidos em função do PH da solução.....	69
Figura 10 – Posição de vários tipos de materiais no sistema $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$	71
Figura 11 – Micrografia em MEV/ES revelando a forma esférica predominante das partículas de cinza volante.....	72
Figura 12 – Micrografia de uma cinza volante revelando muitas partículas sem forma definida.....	72
Figura 13 – Micrografia de um aglomerado de partículas de sílica ativa.....	74
Figura 14 – Superfícies silicosas externa e interna da casca de arroz reveladas por micrografia das cinzas obtidas em combustão controlada em leito fixo.....	77
Figura 15 – Micrografia feita em MEV de cinza de casca de arroz onde se pode observar a estrutura original de sílica amorfa.....	77
Figura 16 – Representação esquemática do processo de reação de gaseificação e combustão no modelo de núcleo não reagido de partículas de carvão.....	81
Figura 17 – Corte vertical do esquema de queima patenteado por SUGITA.....	83
Figura 18 – Separação do efeito pozolânico e efeito filer em pastas e concretos.....	87
Figura 19 – Fotografia da fornalha de leito fixo usada para queima de casca de arroz.....	92
Figura 20 – Primeira etapa da queima da casca de arroz em leito fixo quando o ar é injetado de cima para baixo.....	93
Figura 21 – Segunda etapa da queima da casca de arroz em leito fixo quando o ar é injetado de cima para baixo.....	94
Figura 22 – Corte vertical esquemático de uma câmara de combustão da fornalha	95
Figura 23 – Fotografia da mesa de controle de temperatura e vazão de ar.....	95

Figura 24 – Temperaturas medidas pelos termopares d1, d2, d3, d4 e d5.....	97
Figura 25 – Temperaturas em função do tempo nos termopares d1, d2, d3, d4 e d5.....	101
Figura 26 – Da esquerda para a direita a cinza branca, cinza de tom cinza e cinza preta.....	101
Figura 27 – Difratoograma de Raios-X da cinza de casca de arroz de alto teor de carbono.....	102
Figura 28 – Difratoograma de Raios-X da cinza de casca de arroz de médio teor de carbono.....	103
Figura 29 – Difratoograma de Raios-X da cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono.....	103
Figura 30 – Resistências à compressão dos concretos com 14 % de substituição pozolânica.....	116
Figura 31 – Cinza de casca de arroz após moagem por duas horas.....	117
Figura 34 – Fluxograma das rotinas de cálculo do software para determinação da mistura mais econômica para o CAD em função de fcj, Q91, e preços dos materiais.....	134
Figura 35 – Tela de entrada de dados do software com os valores usados nas simulações.....	135
Figura 36 – Consumos de materiais aglomerantes em função da resistência à compressão das misturas aleatórias e das misturas calculadas pelo software para o menor custo.....	137
Figura 37 – Valores de Q91 dos concretos em função da resistência à compressão das misturas experimentais aleatórias e das misturas calculadas pelo software para o menor custo..	138
Figura 38 – Consumos de superplastificante em função da resistência à compressão.....	139
Figura 39 – Consumos de cimento, sílica ativa, cinza volante e superplastificante previstos pelo software para produção de concretos de menores custos.....	139
Figura 40 – Consumos calculados de cinza volante em função da resistência à compressão para produção de concretos de menores custos.....	140
Figura 41 – Custos calculados pelo software de todos os materiais por metro cúbico de concreto e os custos das misturas feitas para o estudo de dosagem.....	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Abreviações usadas para designar os óxidos presentes no cimento Portland.....	9
Tabela 2 - Principais compostos presentes no cimento Portland.....	10
Tabela 3 - Influência da área específica do cimento na tensão limite de cisalhamento de pastas de relação água/cimento igual a 0,40.....	16
Tabela 4 - Maiores dimensões de partículas que entram em vibração em função da frequência com que são solicitadas.....	25
Tabela 5 - Frequência recomendada em função do diâmetro da agulha.....	26
Tabela 6 - Sentido de evolução de diversos parâmetros da dosagem em função da trabalhabilidade, da resistência mecânica e do custo.....	31
Tabela 7 - Quadro comparativo de proporções para Concretos de Alto Desempenho.....	54
Tabela 8 – Quadro resumo que mostra quais os materiais que cedem espaço para o cimento (ou aglomerante) em cada método para se conseguir misturas com maiores resistências.....	65
Tabela 9 - Classificação, composição e caracterização das partículas de aditivos minerais para o concreto.....	70
Tabela 10 - Resultados do trabalho de BONAVETTI et al.....	86
Tabela 11 –Evolução da temperatura medida no termopar d2 com aproximação da frente de combustão.....	98
Tabela 12 -Evolução da temperatura medida no termopar d3 com aproximação da frente de combustão.....	99
Tabela 13 - Caracterização física e química do cimento.....	106
Tabela 14 - Características físicas dos agregados.....	106
Tabela 15 - Características físicas e químicas do cimento e pozolanas.....	107
Tabela 16 - Características químicas das pozolanas.....	107
Tabela 17 - Resultados dos ensaios de diferença de condutividade das pozolanas.....	108
Tabela 18 - Resumo das proporções volumétricas dos aglomerantes para as misturas.....	110
Tabela 19 - Quantidade em volume por betonada dos materiais das pastas dos concretos.....	110
Tabela 20 - Quantidade em massa por betonada dos materiais das pastas dos concretos.....	111
Tabela 21 - Volumes de materiais por metro cúbico de concreto.....	112
Tabela 22 - Massa de materiais por metro cúbico de concreto.....	112
Tabela 23 - Resistência à compressão dos concretos a cada idade.....	113
Tabela 24 - Resultados dos ensaios de penetração acelerada de cloretos.....	113

Tabela 25 - Valores da norma ASTM C-120 para a penetração e cloretos.....119

Tabela 26 - Penetração de cloretos para os concretos com 14 % de substituição pozolânica..... 119

Tabela 27 - Índices de correlação na regressão múltipla entre resistência à compressão com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo.....121

Tabela 28 - Logaritmo da carga passante do ensaio de penetração acelerada de cloretos (56 dias).. 122

Tabela 29 - Resumo da estatística de regressão múltipla da variável Log Q a 56 dias em função das variáveis Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo..... 122

Tabela 30 - Estatística de regressão múltipla da variável Vsuper/Vpasta em função das variáveis Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo, até 35% de pozolana..... 123

Tabela 31 - Estatística de regressão múltipla da variável Vsuper/Vpasta em função das variáveis Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo, até 21% de pozolana 124

Tabela 32 - Índices de correlação na regressão múltipla entre resistência à compressão em função das variáveis Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo e Vcca/Vaglo..... 125

Tabela 33 - Estatística de regressão múltipla da variável log Q (91 dias) em função das variáveis Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo do trabalho de ISAIA..... 126

Tabela 34 - Estatística de regressão múltipla da variável Vsuper/Vpasta em função das variáveis Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo de ISAIA..... 127

Tabela 35 - Estatística de regressão linear entre Vpasta/Vconc e Vaglo/Vpasta para os dados do trabalho de ISAIA..... 128

NOTAÇÃO E NOMENCLATURA

CAD - concreto de alto desempenho

f_{cj} - resistência à compressão do concreto à "j" dias de idade, em MPa ;

a/c - relação água/cimento em massa do concreto;

K - constante qualquer;

α - teor de argamassa seca em massa do concreto;

m - traço (proporção de agregados em relação à massa de cimento);

a - proporção de areia em relação à massa de cimento

H - relação água / materiais secos em massa;

C - consumo de cimento por metro cúbico de concreto;

Ic - índice de consistência;

CCA - cinza de casca de arroz;

CV - cinza volante;

SA - sílica ativa;

EAF - escória de alto forno;

c - cimento;

CEC - custo equivalente de cimento;

PF - perda ao fogo;

IAP - índice de atividade pozolânica com cimento;

super - superplastificante;

plast- plastificante;

Vaglo - volume de aglomerante;

Aglomerante – cimento mais pozolanas

Vpasta - volume de pasta;

Vcim - volume de cimento;

Vsa - volume de sílica ativa;

Vcca - volume de cinza de casca de arroz;

Vcv - volume de cinza volante;

Vconc - volume de concreto;

Vsuper - volume de superplastificante;

MEV/ES - microscopia eletrônica de varredura / elétrons secundários;

DRX - difração de Raios-X;

Slump - abatimento do concreto no ensaio de consistência pelo tronco de cone;

RESUMO

O presente trabalho inspira-se na teoria de Abrams ao procurar uma relação entre a resistência à compressão do concreto de alto desempenho e várias relações em volume dos materiais da pasta de cimento. Faz o mesmo para a resistência à penetração de cloretos e encontra excelentes índices de correlação múltipla, dado um conjunto de materiais disponíveis. Encontrada uma regra possível de ser utilizada em diferentes misturas e variados materiais, propõe-se uma metodologia de dosagem, que tem o auxílio de um software, criado para encontrar a mistura mais econômica que satisfaça os requisitos de resistência e durabilidade. No trabalho também é realizado um estudo da queima de casca de arroz e de requeima de cinza de casca de arroz proveniente de combustão em fornalha de leito fluidizado, cujo objetivo foi produzir cinzas de cor branca, ou cinzas com reduzidos teores de carbono, a fim de melhorar a aceitação dessas cinzas ao evitar que o seu uso implique na obtenção de um concreto de tonalidade diferente da usual. Os resultados das experiências mostram que é possível fazer isso com um método simples e de baixo custo, o que pode ajudar a viabilizar o uso comercial desse material.

ABSTRACT

The present work is inspired by the Abrams theory when seeking a relationship among the compressive strength of the high strength concrete and several other variables, being them relationships in volume of the materials of the cement paste. The same is done for the chloride penetration resistance, and was found excellent indexes of multiple correlation, given a group of available materials. Founded a possible rule of being used in different mixtures and varied materials, it is proposed a dosage methodology, with aid of a software, with its focus in to find the most economical proportion than it satisfies the compressive strength and durability requirements. In the present work a study is also accomplished about the burn of rice husks, and of doing a second burn of the rice husk ashes originating from combustion in fluidized bed furnace, whose objective was to produce ashes of white color, or ashes with reduced carbon contents, in order to improve the acceptance of those ashes when avoiding that its use implicates a concrete with color different from the usual. Results showed that it is possible to do that with a simple method and of low cost, what can help to become possible the commercial use of this material.

INTRODUÇÃO

Vivemos um tempo em que os recursos naturais começam a ser percebidos como limitados. À medida que o desenvolvimento científico e tecnológico eleva a expectativa de vida do ser humano, nossa espécie se multiplica e demanda mais matéria-prima e energia, e o planeta começa a dar sinais de que há um limite para a exploração das fontes da natureza. Na sua breve estada pela Terra o homem muda a paisagem paradisíaca, troca cachoeiras por barragens de concreto, rios por vias navegáveis, rasga florestas, pavimenta rodovias, e aglomera-se em metrópoles feitas de edifícios e viadutos de concreto. Porém, contrariando esse caminho de destruição que parece natural, todas as áreas da ciência começam a dar uma maior ênfase à procura de soluções que minimizem o impacto de nossa passagem pela vida.

O concreto em si, é por muitos, considerado um material ecologicamente correto. Possui durabilidade razoável a um custo energético aceitável, principalmente se comparado a outros materiais, mas tem utilização de um volume considerável de matéria-prima. Porém, é também visto com muita simpatia pela sua capacidade de absorver grandes quantidades de rejeitos de outros processos industriais, sendo, em função disso, considerado o grande depósito de resíduos da humanidade.

É muito difícil imaginar a paisagem do mundo se o concreto não fosse possível. O concreto convencional é um velho conhecido da humanidade, centenário, tem sido usado para se construir quase tudo. Mas o concreto convencional tem durabilidade limitada. As obras têm sido projetadas normalmente para durar 30, 40 ou 50 anos com um mínimo de manutenção e, em muitos casos, duram bem mais que isso. Entretanto aquelas obras expostas a meios mais agressivos têm tido vida útil muito menor que o previsto. Mesmo quando duram o tempo projetado, começa-se a perceber que a edificação poderia continuar a ter utilidade ainda por muitos anos, se a estrutura pudesse resistir por mais tempo. Razões econômicas, pela necessidade de se construir algo no lugar, e razões ambientais, por ter que se buscar novos recursos naturais para a nova obra, e mais o entulho gerado na demolição da velha edificação, levam os cientistas à busca de um material mais durável.

O Concreto de Alto Desempenho (CAD) é um novo material que vem para satisfazer nossas necessidades de tecnologias de construção com enfoque na conservação do planeta em que vivemos. Ele é a evolução natural do concreto de alta resistência, que teve este nome por muito pouco tempo, pois logo se percebeu que o novo material tinha muito mais que uma resistência mais elevada. O concreto de alta resistência, que foi possível graças ao advento de aditivos químicos que minimizam o conteúdo de água das misturas frescas, tende a ser um

concreto de alto desempenho, mesmo que nem sempre isso aconteça, por possuir uma pasta muito mais densa e menos permeável. Para poder durar muito mais que o concreto convencional e permitir estruturas com menor volume de materiais, há naturalmente a necessidade de utilização de adições pozolânicas para que possua todas as qualidades que o classificam como concreto de alto desempenho. Como muitas pozolanas são cinzas provenientes de rejeitos de processos industriais, o concreto, agora renovado tecnologicamente, mais uma vez demonstra seu potencial ecológico.

Por ser novo, ainda há muito que ser pesquisado para que o CAD possa tornar-se parte do cotidiano da indústria da construção. Hoje ele quase só é utilizado em obras especiais, principalmente por falta de conhecimento do meio técnico e empresarial, porém esta é uma situação que está mudando rapidamente. No meio científico, reconhece-se que o estudo de dosagem (projeto de misturas) ainda é um processo empírico-intuitivo, e que só a pesquisa pode levar ao conhecimento necessário ao aproveitamento de todo o potencial que o material promete.

O presente trabalho traduz essa preocupação ao buscar um modo de ampliar nossa capacidade de projetar misturas para concreto de alto desempenho, que atendam às nossas expectativas de resistência, durabilidade e economia de recursos financeiros e naturais. Procura-se dar uma continuidade ao processo de busca pela melhoria dos métodos de estudo de dosagem já conhecidos, quando o presente trabalho se concentra na procura de relações entre propriedades do concreto de alto desempenho e a composição em volume das misturas. Busca-se através da estatística, prever matematicamente a mistura mais econômica que atenda aos requisitos de projeto.

Outro assunto tratado com especial interesse pelo trabalho é a investigação de um meio de impulsionar o uso da cinza de casca de arroz como adição na produção do concreto de alto desempenho. Hoje ela é reconhecida como um material de excelentes propriedades pozolânicas, mas não tem sido usada industrialmente. Procura-se então entender porque a cinza de casca de arroz não tem tido a utilização que merece, a despeito do baixo custo e grande disponibilidade. Uma resposta tecnológica é dada à questão através do desenvolvimento de um método de queima da casca de arroz e da requeima de cinzas já existentes.

O trabalho teve dois objetivos gerais. O primeiro objetivo geral foi encontrar um modo de produzir cinzas de casca de arroz com baixos conteúdos de carbono para uso como adição pozolânica ao concreto de alto desempenho. O objetivo se justifica pela observação de que há uma forte rejeição à da cinza de casca de arroz, por parte dos produtores de concreto, apesar de seu grande potencial como adição pozolânica. O motivo são os altos teores de carbono geralmente encontrados nestas cinzas, cuja consequência é uma coloração escura do concreto,

que denuncia aos consumidores a adição de um elemento estranho aos materiais de uso cotidiano, prejudicando, na visão dos produtores, seu valor comercial. Este objetivo geral resultou em dois objetivos específicos. O primeiro foi produzir cinzas brancas, portanto com reduzidíssimos teores de carbono, a partir da pirólise e combustão da casca de arroz crua. O segundo foi produzir cinzas de cor cinza, ou seja, com teores aceitáveis de carbono, a partir de uma segunda queima de cinzas de casca de arroz com altos teores de carbono, provenientes de queima industrial em fornalha de leito fluidizado.

O segundo objetivo geral do trabalho foi a obtenção de uma maneira de explicar a resistência à compressão, e também a resistência à penetração de cloretos, de concretos de alto desempenho, em função de relações volumétricas entre os materiais usados na produção da pasta. Um objetivo específico derivado deste objetivo geral foi a concepção de um método para prever os volumes de todos os materiais da mistura mais econômica provável de um concreto de alto desempenho a partir dos resultados de um conjunto limitado de misturas. Outro foi o desenvolvimento de um software para realização dos cálculos necessários.

O Capítulo I faz uma breve, mas ampla revisão bibliográfica sobre o Concreto de Cimento Portland, procurando proporcionar ao leitor da área de ciência dos materiais, que não tenha muita intimidade com este material, uma introdução ao universo do estudo e fabricação do concreto. Começa discorrendo sobre a importância do material na indústria da construção civil, passa pela descrição do cimento Portland, suas reações químicas e propriedades e, em seguida, trata da fabricação e propriedades desejadas para um concreto de qualidade. O citado capítulo dedica especial atenção em mostrar que existe uma relação conflitante entre a resistência à compressão, principal propriedade mecânica do concreto, e a trabalhabilidade das misturas frescas, cuja resolução é o principal foco de atenção de um estudo de dosagem. Termina discorrendo sobre como são feitos os estudos para uma dosagem de concreto e, por fim, mostra um resumo passo a passo de um dos métodos para estudo de dosagem mais adotados no Brasil.

O Concreto de Alto Desempenho é apresentado no Capítulo II como um concreto de cimento Portland que possui melhores características mecânicas e maior durabilidade que o concreto convencional, derivando daí o seu nome. Trata das diferenças existentes entre os dois concretos em relação a várias propriedades, e mostra que, para ser um CAD, esse material precisa possuir outros componentes na sua fabricação. A dosagem do concreto de alto desempenho é o principal foco de atenção do capítulo, que trata da dificuldade em projetar misturas com um número muito maior de variáveis se comparado ao concreto convencional, mostrando que as relações entre os vários materiais adicionados para a produção deste novo concreto ainda não estão totalmente explicadas. Em seguida, parte para a descrição de vários e

importantes métodos de dosagem do concreto de alto desempenho, descrevendo, passo a passo, as etapas seguidas por cada um deles. O capítulo procura mostrar os princípios fundamentais adotados por cada método, mesmo quando estes não estejam claramente explicitados nas descrições originais.

No Capítulo III são tratados com maiores detalhes os materiais pozolânicos e sua importância para fabricação dos concretos de alto desempenho. Trata das reações pozolânicas e sua contribuição na melhoria do desempenho do concreto, mas também dos efeitos benéficos promovidos por essa classe de materiais que advêm de efeitos físicos. A possível sinergia existente, quando da utilização de mais de uma pozolana num mesmo concreto, também é mostrada como uma nova possibilidade de melhorar ainda mais o desempenho tecnológico e econômico desses materiais, o que acarreta, entretanto, em aumentar ainda mais o número de variáveis do estudo de dosagem.

Neste capítulo uma atenção especial é dada à cinza de casca de arroz, uma pozolana que possui um potencial econômico e tecnológico muito grande, mas que não tem sido realmente utilizada, apesar de reconhecida como um material de excelentes propriedades e da disponibilidade de grandes volumes a preços reduzidos. Suscita a hipótese do material ser rejeitado pelos produtores de concreto porque as cinzas atualmente produzidas como rejeito das indústrias produtoras de arroz têm altos teores de carbono, e por isso possuem cor preta, o que implicaria na produção de um concreto de tom cinza muito intenso, arriscando a possibilidade do material ser rejeitado pelos consumidores. Em função disso o Capítulo III descreve com pormenores este problema. Trata ainda sobre os métodos de queima e da dificuldade de se conseguir queimar completamente a casca de arroz para que a cinza resultante tenha baixo teor de carbono.

A parte experimental da tese começa com o Capítulo IV, que trata de um conjunto de experimentos realizados com dois objetivos específicos distintos. O primeiro, de se conseguir produzir cinzas de casca de arroz de cor branca, através de pirólise, seguida de queima controlada da casca crua, em fornalha de leito fixo intermitente. A hipótese criada para a programação das experiências supõe que a pirólise, com taxa controlada de elevação de temperatura, defendida por alguns autores como necessária para que a queima da casca resulte em cinzas brancas, pode ser produzida usando o calor irradiado pela combustão dos próprios gases obtidos durante a pirólise, desde que o ar para combustão seja injetado de cima para baixo, no sentido contrário ao caminho efetuado pela frente de combustão de gases, possibilitando a realização de uma etapa de pirólise e combustão de gases, seguida de uma etapa de combustão do carbono fixo. Os resultados dos experimentos comprovam a hipótese e permitem explicar

como o processo se realiza, sendo ainda inovador pelo fato de proporcionar um método econômico para produção de um material que pode ter um valor monetário muito grande.

O segundo objetivo específico foi a experimentação da hipótese de se reduzir o conteúdo de carbono de cinzas residuais provenientes de queima em fornalhas de leito fluidizado, mesmo que as cinzas não fiquem brancas, mas sim com cor cinza, através de uma segunda queima, em fornalha de leito fixo, com auxílio da adição de pequena quantidade de casca crua. O objetivo foi plenamente alcançado e provou-se ser possível reduzir os teores de carbono dessas cinzas, sendo o processo simples e econômico. Esta solução inédita para o problema dos enormes volumes de cinza de casca de arroz existentes no mundo, hoje consideradas apenas rejeito industrial, permite que esse material possa ser devidamente aproveitado. Além disso, a solução evita que as indústrias que atualmente já possuem fornalhas de leito fluidizado tenham que trocar equipamentos, e alterar os processos de queima que já utilizam, para que possam ter aproveitamento de seus resíduos.

O Capítulo V descreve a dosagem de um conjunto de misturas para concreto de alto desempenho realizadas para o trabalho, feitas com o objetivo de provar a segunda hipótese geral do trabalho, de que a resistência à compressão do concreto de alto desempenho poderia ser explicada como função das relações volumétricas entre os vários componentes presentes na pasta de cimento. Para isso, vários ensaios de caracterização de materiais foram feitos, e muitas misturas para concreto foram dosadas, considerando as variáveis em volume ao invés de considerá-las em massa. Dos concretos fabricados, são fornecidos os resultados dos ensaios de resistência à compressão para as idades de 1, 3, 28 e 63 dias, e ainda a resistência à penetração acelerada de íons cloreto a 56 dias de idade. Também nesse capítulo é feita a comparação de propriedades entre concretos confeccionados com as diferentes cinzas de casca de arroz obtidas dos experimentos descritos no Capítulo IV, e também com concretos contendo adição de sílica ativa e/ou cinza volante.

No Capítulo VI, é feita uma série de regressões lineares múltiplas, procurando explicar, para um dado conjunto de materiais, as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto de alto desempenho, em função das relações volumétricas entre os componentes da pasta, a exemplo do que ABRAMS (1925) fez para o concreto convencional, quando explicou a resistência do concreto em função da relação água/cimento. O trabalho procura encontrar uma relação entre a resistência à compressão do concreto e as variáveis (volume de aglomerante)/(volume de pasta), (volume de cimento)/(volume de aglomerante), (volume de pozolana)/(volume de aglomerante). Desse modo demonstra, ao encontrar excelentes índices de correlação na regressão, a possibilidade de se usar as equações encontradas na regressão para

prever a resistência de um concreto, feito a partir de um conjunto de materiais conhecidos, dados os teores de cada material numa mistura.

Em seguida faz-se uma regressão linear múltipla, da resistência à penetração de cloretos, em função das mesmas variáveis usadas para explicar a resistência à compressão, e os resultados demonstram proporcionar bons índices de correlação. Depois, para tentar viabilizar um método de dosagem econômica que possa ser auxiliado por computador, procura-se encontrar a correspondência entre a variável (volume de superplastificante)/(volume de pasta) e as mesmas variáveis que explicaram a resistência à compressão e a resistência à penetração de cloretos e, novamente, consegue-se ótimos índices de correlação. Têm-se aí obtido o conjunto de variáveis para se poder prever, para concretos com mesmos teores de pasta, a resistência à compressão e a resistência à penetração de cloretos, em função da composição da mistura.

Para confirmar a validade da existência de correlação entre aquelas variáveis ao usar outros materiais, e ainda para possibilitar o uso das mesmas regras para concretos com diferentes teores de pasta, fez-se as mesmas correlações com os dados das misturas para concreto de alto desempenho do trabalho de doutorado de ISAIA (1995) e os índices de correlação continuaram demonstrando a validade das hipóteses. Por fim, para possibilitar prever as quantidades de todos os materiais de uma composição mais econômica de concreto, quando no método utilizado para a dosagem há variação dos teores de pasta, caso dos dados dos concretos do trabalho de ISAIA (1995), fez-se uma regressão linear simples entre (volume de pasta)/(volume de concreto) e (volume de aglomerante)/(volume de pasta), encontrando excelentes índices de correlação. Com isso, o capítulo termina mostrando que, dado um conjunto de materiais e dosados um conjunto de concretos, com os resultados dos ensaios de resistência à compressão e de resistência à penetração de cloretos, pode-se efetuar regressões lineares e obter as equações que explicam as propriedades em função da composição do concreto. Essa é uma solução inédita, que pode ajudar o profissional que dosa o concreto a encontrar com menor dificuldade a combinação mais econômica de materiais que proporcione as propriedades desejadas.

No Capítulo VII é proposta uma metodologia de estudo de dosagem que tem como ponto de partida o método de estudo de trabalhabilidade usado por ISAIA (1995), e como ponto de chegada o uso de um software dedicado a encontrar a proporção mais econômica de um concreto em função da resistência à compressão e da resistência à penetração de cloretos, dados os coeficientes das equações de regressão múltipla, conforme a descrição que é feita no Capítulo VI, dado um conjunto de materiais. Um fluxograma das rotinas de cálculo usadas pelo programa é mostrado no capítulo, e o programa, desenvolvido em Q-Basic, é integralmente reproduzido no Anexo C, para possibilitar seu uso por outros pesquisadores. Por fim, são feitas algumas

simulações com o software, usando os coeficientes das equações obtidas de regressões com concretos contendo sílica ativa e cinza volante, e os resultados são comparados com os valores dos concretos originais. Verifica-se que o software consegue encontrar proporções econômicas com muito mais facilidade do que se poderia encontrar de outro modo.

O Capítulo VIII é dedicado às conclusões, sugestões para novos trabalhos e considerações finais.

CAPÍTULO I

O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

1.1 - O CONCRETO COMO MATERIAL PARA CONSTRUÇÃO

O concreto de cimento Portland é um material para construção que se constitui da mistura de um material granular miúdo, geralmente areia, um material granular graúdo (fragmentos de rocha), cimento, água e, em certos casos, aditivos orgânicos e adições minerais, que endurece por reação do cimento, e eventualmente das adições, com a água. O aglomerado que se forma após o endurecimento da mistura possui várias características que o torna um material ideal para construção de estruturas, ou outros fins. Dentre elas, destaca-se o fato do concreto possuir uma das melhores relações custo/resistência mecânica entre os materiais estruturais, e de também poder possuir, se convenientemente dosado, baixa permeabilidade e grande estabilidade frente aos mais diversos meios agressivos.

É o material mais largamente utilizado em construção civil no mundo. Em muitos países, o consumo de concreto é 10 vezes maior que o de aço. Em artigo publicado pela revista Scientific American em 1964, cita-se que o consumo mundial de concreto no ano anterior fora estimado em três bilhões de toneladas, ou seja, uma tonelada por ser humano vivo. O homem não consome nenhum outro material em tal quantidade a não ser a água. Hoje, estima-se que o atual consumo mundial de concreto seja da ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

De acordo com esses autores, apesar do concreto não ser nem tão resistente ou tão tenaz quanto o aço, há algumas razões para ser o material mais largamente usado na engenharia, quais sejam:

- Possui excelente resistência à água, podendo ser utilizado na construção de barragens, canais, tanques, aquedutos, pontes, túneis, pavimentos, etc.;
- Pode receber armaduras de aço e outros materiais, aumentando suas propriedades mecânicas de acordo com as necessidades da obra;
- Pode ser moldado em várias formas e tamanhos, propiciando grande liberdade de projeto arquitetônico;
- É o material estrutural normalmente mais barato e mais facilmente disponível no canteiro de obras;
- Comparado à maioria dos outros materiais de engenharia, a produção de concreto requer consideravelmente menor consumo de energia, incluídos aí a energia para fabricação do cimento e extração e britagem dos agregados;

- Recebe grande quantidade de rejeitos industriais em substituição de parte do cimento ou agregados, diminuindo os custos e contribuindo com a conservação do meio ambiente.

1.2 – O CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é basicamente o produto da calcinação de uma mistura de calcário, composto predominantemente por CaCO_3 , e materiais argilosos, à base de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , onde também estão presentes outros constituintes secundários, como : óxido de magnésio, fosfatos, álcalis, etc. A mistura proporcionada dos constituintes principais (aproximadamente 3:1), além de eventualmente outros (areia, cinza de piritá, etc.), é calcinada em forno rotativo a uma temperatura em torno de 1500 °C. Obtém-se então novos compostos químicos que aglomeram-se em grânulos denominados clínquer (NEVILLE, 1997).

Após sofrer resfriamento brusco por injeção de ar na saída do forno, o clínquer é moído juntamente com compostos sulfáticos, geralmente a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), numa porcentagem de 1 a 5 %, para formar o cimento Portland. Os cimentos de alto-forno e pozolânicos são obtidos, respectivamente, misturando-se ao Portland escórias de alto-forno e pozolanas.

Embora o cimento Portland consista essencialmente de vários compostos de cálcio, os resultados de análises químicas de rotina são expressos em termos de óxidos dos elementos presentes. Isto porque a determinação direta da composição dos compostos requer equipamentos e técnicas especiais. É costume expressar os compostos individuais dos óxidos do clínquer usando-se as seguintes abreviações colocadas na tabela 1. Na tabela 2 estão dispostos os compostos do cimento Portland e suas porcentagens usuais.

Tabela 1 – Abreviações usadas para designar os óxidos presentes no cimento Portland (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

ÓXIDO	ABREVIACÃO
CaO	C
SiO ₂	S
Fe ₂ O ₃	F
Al ₂ O ₃	A
MgO	M
Na ₂ O	N
K ₂ O	K
SO ₃	\bar{S}

Tabela 2 - Principais compostos presentes no cimento Portland (adaptado de MEHTA & MONTEIRO, 1994)

ABREVIACÃO	FÓRMULA / DENOMINAÇÃO	PROPORÇÃO (%)
C ₃ S	3CaO.SiO ₂ Silicato Tricálcico	55 – 60
C ₂ S	2CaO.SiO ₂ Silicato Dicálcico	15 – 10
C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃ Aluminato Tricálcico	10 – 12
C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .FeO ₃ Aluminato Tetracálcico	8 – 7
Outros	Gesso (CaSO ₄), Álcalis (Na ₂ O e K ₂ O), Magnésio (MgO), Cal Livre (CaO), Silicatos e Aluminatos, TiO ₂ , Mn ₂ O ₃ , CaF ₂ , P ₂ O ₅ , etc.	< 12

O sistema CaO - Al₂O₃ - SiO₂ é o principal na química do cimento. No diagrama de fases ternário mostrado na Figura 1, está destacada a região de composições das fases principais do cimento Portland C₃S e C₂S.

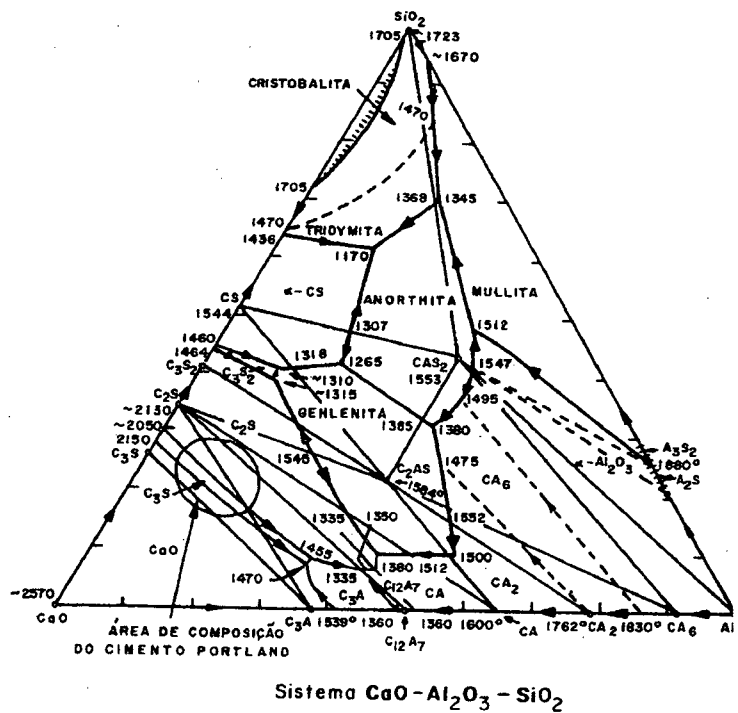


Figura 1 - Sistema CaO - Al₂O₃ - SiO₂ (LEA apud ALVES, 1993)

Os silicatos são praticamente os únicos responsáveis pelas características mecânicas medidas na pasta de cimento. Estes silicatos - C₃S e C₂S - perfazem cerca de 65 a 85 % da massa do cimento (Tipo I) e, na hidratação, formam o gel de C-S-H, o mais importante componente da pasta de cimento hidratada (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Visando simplificar o estudo da hidratação do cimento, é usual substituir o complexo sistema água-cimento pelo sistema água-silicatos. A substituição é aceitável tendo em vista serem os silicatos os constituintes mais efetivos e estarem presentes em maior proporção. A morfologia dos hidrossilicatos tende a partículas fibrosas com dimensões de alguns microns que recobrem os grãos dos silicatos anidros. Em geral, o material é pouco cristalino e forma um sólido poroso que apresenta características de um gel rígido (NEVILLE, 1997).

Considerando que a composição química dos silicatos de cálcio hidratados varia com a relação água/cimento, temperatura e idade de hidratação, tornou-se comum referir-se a esses hidrossilicatos simplesmente como C-S-H, uma notação que não implica em uma composição fixa. No caso da hidratação completa, a composição aproximada do material corresponde ao $C_3S_2H_3$, sendo esta composição então utilizada para cálculos estequiométricos.

Durante a hidratação, os microcristais do C-S-H, como pequenos filamentos de um feltro, surgem na superfície do cimento e se cristalizam. No final da hidratação, já macrocristais, formam uma superfície específica total com cerca de $200 \text{ m}^2/\text{g}$ (POWERS, 1968). Sente-se a magnitude deste número ao compará-lo com a superfície específica do cimento anidro que é da ordem de $0,9 \text{ m}^2/\text{g}$ pelo método de adsorção de nitrogênio, ou $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ de finura BLAINE (NEVILLE (1997)). Dada a natureza da superfície de cristalização, os macrocristais aderem entre si e se entrelaçam, aderindo também aos cristais do agregado, formando assim uma estrutura sólida. A figura 2 mostra uma micrografia feita pelo presente autor de uma pasta hidratada de cimento Portland obtida de uma amostra fraturada aos 28 dias de idade. Pode-se observar a porosidade, o gel de C-S-H e alguns grandes cristais bem definidos de Ca(OH)_2 .

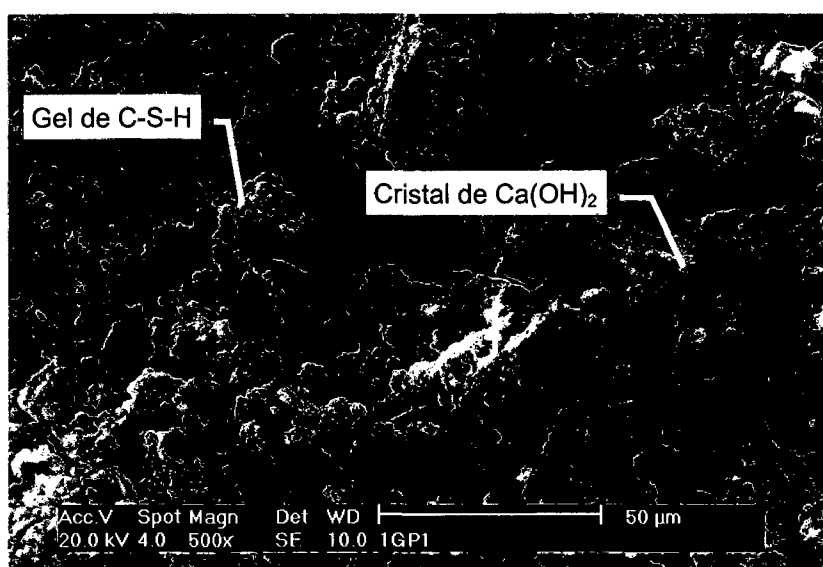
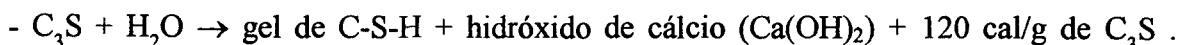


Figura 2 – Micrografia em MEV/ES de pasta de cimento hidratada onde pode-se observar o gel de C-S-H, a porosidade e cristais de Ca(OH)_2

Os componentes do cimento mais ricos em CaO reagem fortemente com a água formando o gel de C-S-H e hidróxido de cálcio, liberando muito calor. O calor gerado na hidratação também é indiretamente responsável pela resistência mecânica da pasta, pois pode gerar microfissuras de retração térmica. O calor também acelera as reações de hidratação podendo contribuir com a resistência nas menores idades.

As duas reações mais importantes para a resistência são (MEHTA & MONTEIRO, 1994):



Propicia alta resistência inicial e forte desprendimento de calor de hidratação (cerca de 80 % em 10 dias);

- $C_2S + H_2O \rightarrow \text{gel de C-S-H} + \text{hidróxido de cálcio} + 60 \text{ cal/g de } C_2S$. Propicia lento e constante desenvolvimento de resistência e baixo calor de hidratação (cerca de 80 % em 100 dias);

Parte dos componentes restantes, embora pouco representando para o desenvolvimento da resistência, necessitam estar presentes no cimento por razões práticas e econômicas. Primeiramente, pelo fato de haver grande dificuldade de se obter grandes quantidades de calcário e areia isentos de óxido de ferro e óxido de alumínio. Estas substâncias permitem ainda, que a temperatura de sinterização seja menor, minimizando os custos do processo.

Tais componentes, juntos aos demais constituintes secundários, formam outros produtos de hidratação, e também desprendem forte calor (MEHTA & MONTEIRO, 1994) :



hidratos cristalinos tais como: C_3AH_6 , C_4AH_9 e C_2AH_8 + 320 cal/g de C_3A - a reação do C_3A com a água é instantânea e há forte desprendimento de calor de hidratação. Não há como produzir um concreto trabalhável se a hidratação do C_3A não for retardada. Por isso adiciona-se gesso, que entra em solução rapidamente, diminuindo a solubilidade do C_3A . Consequentemente diminui-se a velocidade de reação do C_3A com a água, permitindo a produção de misturas trabalháveis por tempo suficiente para serem transportadas, lançadas e adensadas antes que o material comece a endurecer. Outra consequência da adição de gesso é a formação de etringita e monossulfato. Essas reações resultam em pouca contribuição ao desenvolvimento de resistência mecânica e a formação de monossulfato implica em baixa resistência ao ataque de sulfatos. Essa baixa resistência à sulfatos se deve à combinação de monossulfatos com sulfatos numa reação expansiva que forma etringita;

- $C_4(AF) + H_2O + \text{gesso} \rightarrow C_6A(F)\bar{S}_3H_{32}, C_4A(F)\bar{S}H_{18}$ mais vários hidratos cristalinos tais como: $C_3A(F)H_6$, $C_4A(F)H_9$ e $C_2A(F)H_8 + 100 \text{ cal/g de } C_4(AF)$. As reações produzem produtos de estruturas cristalinas semelhantes às produzidas na hidratação do C_3A , onde o ferro pode substituir posições que seriam ocupadas pelo alumínio. Entretanto as reações são bem mais lentas que as anteriores em função da menor energia disponível e, por isso, menos importantes. Essas reações resultam em pouca contribuição ao desenvolvimento de resistência mecânica e a formação de $C_4A(F)\bar{S}H_{18}$ também implica em baixa resistência ao ataque de sulfatos;

- $MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + 200 \text{ cal/g de } MgO$. Pouco importante sua geração de calor devido ao seu baixo teor no cimento (a NBR 5732 permite até 6,5 %). A reação é lenta, expansiva e sob certas condições pode causar deterioração no concreto;

- $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 275 \text{ cal/g de } CaO$. Geralmente é pouco importante sua geração de calor devido ao seu baixo teor no cimento. A reação é rápida e expansiva e pode causar deterioração no concreto.

1.3 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRABALHABILIDADE – PRINCIPAIS PARÂMETROS PARA DOSAGEM DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

1.3.1 - A resistência à compressão do concreto

Na reação de hidratação do cimento no concreto, os compostos formados vão aos poucos preenchendo os vazios da mistura, formando uma massa sólida que, com o tempo, adquire as propriedades mecânicas que dele se espera. O sólido que se forma após o endurecimento da mistura tem como uma de suas características principais possuir grande resistência à compressão e baixa resistência à tração.

POWERS (1968) demonstrou que a resistência à compressão do concreto está diretamente relacionada à porosidade da pasta que, por sua vez, é função da relação a/c do concreto, do grau de hidratação do cimento e do teor de ar (SOBRAL, 1977). Por outro lado, a resistência à tração do concreto, especialmente importante nas peças sujeitas a esforços de flexão, correlaciona-se muito bem com a resistência à compressão (BUCHER & RODRIGUES, 1983; MACEDO et al., 1988). A porosidade da pasta é também responsável pela permeabilidade ao ar e à água e, por isso, também está diretamente relacionada com a capacidade do concreto de

reter água ou de resistir à agressividade do ambiente (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Cada projeto tem suas próprias exigências de resistência mecânica (compressão e tração) e estabilidade frente ao meio ambiente (permeabilidade). Como a porosidade está diretamente relacionada à capacidade do concreto de suprir essas exigências, parece lógico que o projeto deveria fornecer os valores referentes à porosidade máxima que o concreto pode ter, para cada obra, na idade especificada. Porém, a determinação da porosidade é muito difícil, se comparada, por exemplo, ao ensaio de resistência à compressão do concreto. Por isso, a resistência à compressão do concreto quase sempre é o único parâmetro de projeto que se refere ao concreto convencional endurecido. Só nos casos em que a exigência de resistência é muito baixa, ou o concreto estará exposto a meios especialmente agressivos, o projeto também fornece o valor da relação a/c máxima e, indiretamente, está fornecendo o valor máximo para a permeabilidade da pasta do concreto endurecido. Entretanto, como a porosidade também depende do tipo de cimento e da presença de adições, nesses casos especiais o melhor mesmo é o projeto especificar o ensaio de permeabilidade, a idade de ensaio e o valor máximo admissível.

Pelos motivos expostos, praticamente todos os métodos de dosagem de concretos de cimento Portland baseiam-se na resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), que, por sua vez, é o valor de resistência à compressão cuja probabilidade de ocorrência de um valor ainda menor no ensaio à compressão de corpos de prova moldados na obra é considerável. Geralmente adota-se uma probabilidade de que apenas 5% dos corpos de prova de concreto tenham resistência à compressão menor que o valor f_{ck} . No cálculo estrutural este valor é novamente reduzido através de cálculo probabilístico e uso de coeficiente de minoração, para transformá-lo na resistência à compressão com a mínima probabilidade de ocorrer na peça estrutural da edificação, mas, que mesmo assim, ainda possa suportar uma tensão máxima que tenha a mínima probabilidade de ocorrer (URIART, 1982; FUSCO, 1975; SANTOS, 1977). O objetivo do cálculo estrutural é assegurar que a obra tenha uma mínima probabilidade de ruína (SANTOS, 1977).

Muitos países classificam o concreto baseando-se na sua resistência à compressão, referida a 28 dias da data da fabricação. A norma técnica brasileira NBR-8953 classifica o concreto em dois grupos de resistência. O Grupo I contém os concretos com resistências à compressão de 10 a 50 MPa e o Grupo II de 55 a 80 MPa. Existem algumas diferenças nos valores adotados pelas normas técnicas dos diversos países mas, de uma maneira geral, o concreto pode ser considerado convencional quando possuir resistência à compressão até 40 MPa e alta resistência quando acima desse valor (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

1.3.2 – A trabalhabilidade do concreto

Um concreto é dito trabalhável quando ele possui as características de fluidez e estabilidade que os meios de transporte, lançamento, adensamento e acabamento exigirão para esse material. Um concreto pode ser trabalhável para um tipo de serviço e não ser trabalhável para outro. De qualquer forma, a trabalhabilidade sempre estará associada à determinada necessidade de fluidez e estabilidade da mistura fresca.

A trabalhabilidade é frequentemente expressa em termos de consistência, pois trabalhabilidade é um termo muito amplo, e não existe um método de ensaio que possa medi-la. O ensaio de consistência do concreto mais utilizado é o ensaio de abatimento do tronco de cone (NBR7223, 1992), que mede o abaixamento de uma massa de concreto fresco logo após a retirada cuidadosa de uma fôrma metálica em forma de um tronco de cone. Para isso o concreto é introduzido na fôrma em três camadas sucessivas com volumes aproximadamente iguais, cada camada sendo adensada através de 25 golpes feitos uma haste metálica com ponta arredondada. A figura 3 ilustra a execução deste ensaio.

Uma das melhores definições para a trabalhabilidade talvez seja a feita por K.NEWMAN que a define como a medida de, no mínimo, três propriedades: adensabilidade, mobilidade e estabilidade. Para a estabilidade, entendida como sendo a resistência à segregação, B.P.HUGES considera duas etapas: a estabilidade durante o transporte e a estabilidade durante o adensamento (apud PRISZKULNIK, 1977).

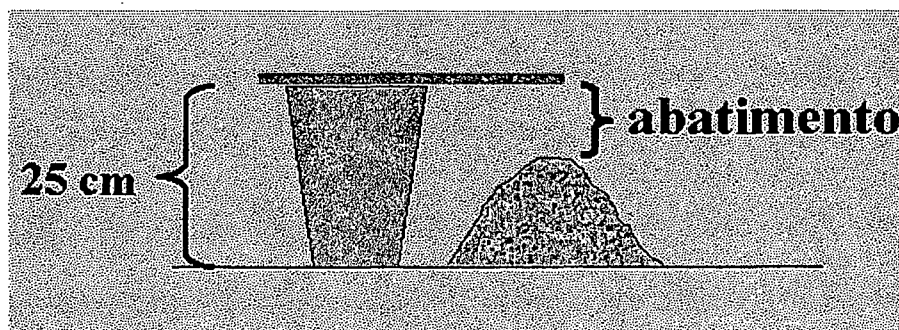


Figura 3 - Ensaio de consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone

Segundo J.P.BOMBLED (apud PRISZKULNIK, 1977), a trabalhabilidade do concreto resulta da composição de dois fatores:

- Fator dinâmico: é a fluidez ou aptidão a deformações sob efeito de um dado método de adensamento, pois é preciso preencher o molde com facilidade e rapidez;

- Fator estático: a estabilidade ou aptidão à conservação da homogeneidade (isto é, a ausência de segregação e de sedimentação). No caso de uma desforma antes da pega, deseja-se adicionalmente, a conservação da forma.

A fluidez e estabilidade são fatores que, de certa forma, caminham em sentidos opostos. Quanto maior a disponibilidade de água de uma mistura, mais fluida ela é, e maior também é a tendência à segregação de seus componentes. Para um concreto se deformar pela aplicação de uma energia de adensamento, moldando-se no espaço da fôrma, é preciso que sejam vencidas as forças que tendem a manter a massa aglomerada. Essas forças podem ser divididas em duas classes: de atração e de atrito.

As forças de atração (ou coesão) são devidas principalmente a:

- Forças de Van der Waals, nas interfaces;
- Forças de origem capilar;
- Força gravitacional, reponsável pela sedimentação.

Nas misturas mais pobres e com teores de água menores que o limite de saturação, a coesão é principalmente devida às forças de origem capilar, ou seja, devido aos tubos capilares de ligação entre os grãos, em função das minúsculas bolhas de ar presentes na mistura (SOBRAL, 1990). Nos traços mais ricos em cimento, as forças elétricas nas interfaces dos grãos (forças de Van der Waals) produzem o efeito maior de atração entre os componentes da mistura. Como são forças que atuam nas interfaces dos grãos, elas aumentam com o aumento da área específica, logo aumentam com o consumo e finura do cimento (ou outros materiais finos). Os valores da tabela 3, feita por J.P.BOMBLED, mostram como a tensão limite de cisalhamento do concreto fresco aumenta rapidamente com o aumento da área específica do cimento (apud PRISZKULNIK, 1977). Isso, mais a forma, textura, porosidade e composição química das partículas, explica porque os cimentos pozolânicos, de finura BLAINE maior que 400 m²/kg , têm elevada demanda por água:

Tabela 3 - Influência da área específica do cimento na tensão limite de cisalhamento de pastas de relação água/cimento igual a 0,40 (BOMBLED apud PRISZKULNIK, 1977)

Área específica do cimento Blaine - (m ² /kg)	Tensão limite de cisalhamento (Pa)
235,0	1.400
278,0	2.650
329,0	7.500
442,5	16.550
560,0	725.000

As forças de atrito são devidas à interação (ou ancoragem) entre os grãos graúdos e miúdos da mistura. Elas dependem da forma, granulometria, dimensão máxima característica do agregado, teor de argamassa da mistura, teor de pasta e características da pasta (disponibilidade de água), teor e finura do cimento (e outros finos). Como se pode verificar, é um conjunto muito grande de influências que geralmente são expressas por um único ensaio (de consistência). É difícil acreditar que esses fatores contraditórios (fluidez e estabilidade) possam ser bem expressos por um único número. E realmente não são. Apesar de muitas vezes aceito como uma medida conjunta desses fatores, dois concretos com mesma consistência podem possuir características de trabalhabilidade muito diferentes entre si (SOBRAL, 1971).

Por exemplo, para um mesmo conjunto de materiais, um traço rico em cimento, com um abatimento do tronco de cone de 60 mm, será muito coeso, mas a argamassa do concreto proporcionará pouco atrito. Em compensação, um traço muito pobre com os mesmos materiais e mesmo abatimento, terá pouca coesão (e tendência à desagregação e segregação), mas terá um atrito entre os grãos maior, devido à falta de pasta para "lubrificar" as superfícies. Uma coisa compensa a outra "no ensaio" de consistência, porém não existe uma equivalência com relação às características desejáveis para o concreto.

É necessário estar muito atento às essas questões para não se deixar enganar. Ao dosar o concreto é preciso avaliar se a mistura realmente atende às necessidades de transporte, lançamento, adensamento e acabamento que o estudo de trabalhabilidade deve responder. Nesta fase é necessária especial atenção para que não seja fornecido para a obra um traço que dê a consistência requerida no ensaio, mas não permita ser trabalhado de modo satisfatório.

1.4 – ALGUNS FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

1.4.1 – Fatores relacionados ao cimento

1.4.1.1 - Composição química e mineralógica do cimento

O cimento Portland é material produzido de modo a ser um produto de baixo custo. Sendo assim, diferentemente de certos cimentos especiais produzidos a partir de matéria-prima de alta pureza, como por exemplo cimentos para uso odontológico, o Portland é produzido a partir de grandes jazidas de argila e calcário. Para fabricar-se milhares de toneladas desse

material, é de se esperar que aconteçam grandes mudanças na composição da matéria-prima utilizada por uma indústria. Apesar disso, as indústrias de cimento possuem rigorosos controles de qualidade e, através da mistura de mais de uma fonte de matéria-prima, de acordo com as necessidades, a produção consegue ter níveis mínimos de variação na composição química.

Espera-se que, entre cimentos produzidos por fábricas diferentes e entre diferentes tipos de cimento Portland, hajam também grandes diferenças na composição química e, conseqüentemente, diferenças significativas nos processos de hidratação conforme já descrito no item 1.2 deste texto. Como as diferenças entre os vários tipos de cimento Portland são grandes e importantes, a ABNT criou normas técnicas com as especificações químicas e físicas para cada tipo (NBR 05732, 1991; NBR 05733, 1991; NBR 05735, 1991; NBR 05736, 1991; NBR 05737, 1992; NBR 09831, 1987; NBR 11578, 1991).

1.4.1.2 - Superfície específica do cimento

A finura (ou superfície específica) de um cimento influencia muito fortemente sua velocidade de hidratação. Para uma dada composição química, pode-se aumentar a resistência de um cimento na idade de controle, geralmente 28 dias, pelo simples aumento de sua superfície específica. É que normalmente após a idade de controle, ainda existe uma grande quantidade de cimento anidro no concreto, que será responsável por um aumento de resistência que continuará enquanto houver cimento não hidratado e água disponível para hidratação. Boa parte do cimento nunca chega a reagir porque, durante a hidratação, o gel de C-S-H recobre o cimento anidro, impedindo a hidratação da camada interior (NEVILLE, 1997).

O aumento na resistência do cimento aos 28 dias de idade pelo aumento da finura tem um limite que se situa em torno de $500 \text{ m}^2/\text{kg}$ pelo Método de BLAINE (TANGO, 1983). Com essa finura, praticamente todo o cimento reage até a idade de controle. Apesar do aumento da finura até o limite supra-citado proporcionar um incremento na resistência aos 28 dias, também representa um aumento bastante significativo nos custos de moagem. Além disso, o aumento na velocidade de hidratação significa também um aumento nas taxas de liberação de calor, o que não é desejável. Existe ainda o aumento na demanda de água pelo concreto. Outra desvantagem da finura muito elevada é que não há acréscimo de resistência além da idade de controle que possa contribuir com a segurança da estrutura. Por esses motivos a maioria dos cimentos possuem finura BLAINE na faixa situada entre 300 e $400 \text{ m}^2/\text{kg}$.

1.4.1.3 - Adições minerais ao cimento

Os cimentos Portland disponíveis comercialmente são misturas homogêneas de cimento Portland com filler (calcário), compostos cimentantes (escória de alto-forno) ou pozolana (cinza volante, cinza de casca de arroz, cinza vulcânica, sílica ativa, etc.). A escória de alto-forno é um produto não metálico, consistindo essencialmente de silicatos e alumino-silicatos de cálcio e outras bases. Escória granulada é o produto vítreo ou não cristalino formado quando a escória de alto-forno fundida é rapidamente resfriada, como por exemplo, pela aspersão com água. Uma pozolana é definida como um material silicoso ou sílico-aluminoso que, em si mesmo, possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Comparada às pozolanas, a escória de alto-forno finamente moída é auto-cimentante, isto é, não necessita de hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes como o C-S-H. Entretanto, quando a escória granulada de alto-forno hidrata por si mesma, a quantidade de produtos cimentantes formados e as taxas de formação são insuficientes para aplicação do material com fins estruturais. Quando usada em combinação com cimento Portland, a hidratação da escória é acelerada na presença de hidróxido de cálcio e gipsita. Durante a hidratação do cimento com escória, eventualmente parte do hidróxido de cálcio produzido pelo cimento Portland é consumido pela reação de hidratação da escória constituinte do cimento.

A reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é chamada **reação pozolânica**. A importância técnica dos cimentos pozolânicos (e também dos cimentos de alto-forno) deriva principalmente de três aspectos da reação pozolânica. Primeiro, a reação é lenta e, portanto, a taxa de liberação de calor e de desenvolvimento da resistência serão lentas. Segundo, a reação consome hidróxido de cálcio ao invés de produzi-lo, o que representa uma contribuição importante para a durabilidade da pasta endurecida de cimento frente a meios ácidos. Terceiro, estudos sobre a distribuição do tamanho dos poros desses cimentos hidratados mostraram que os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando assim a resistência e reduzindo a permeabilidade do sistema. Nos concretos de muito altas resistências, a adição de material pozolânico é indispensável para melhorar o desempenho na zona de transição pasta-agregado gráudo. Geralmente se utilizam de adições de sílica ativa, por ser uma pozolana de alta eficiência. Há também vários estudos do uso da cinza de casca de arroz como material pozolânico, por ter esse material, reatividade também muito elevada.

Importante ressaltar que, embora se considere muitas vezes a reação da escória de alto-forno com a cal como pozolânica, a escória é predominantemente hidráulica, desenvolvendo suas propriedades à temperatura ambiente pela ação de ativantes alcalinos (p.ex.: cal, silicato de sódio, carbonato de sódio e hidróxido de sódio). No caso particular da cal, o cálcio participa da formação do C-S-H. Embora o produto formado em reações de hidratação dos aglomerantes hidráulicos seja o C-S-H, este é diferenciado pelo valor da relação entre $\text{CaO} / \text{SiO}_2$, segundo a origem, cujo valor diminui na seguinte ordem :

Cimento Portland → Escória de Alto-Forno → Pozolana.

A zona de transição é a região de ligação entre a pasta de cimento e o agregado. Como, no caso da pasta, a causa da adesão entre os produtos de hidratação e a partícula de agregado são as forças de Van der Waals, a resistência da zona de transição em qualquer ponto depende do volume e do tamanho dos vazios presentes. Mesmo para concreto de baixa relação água/cimento, nas primeiras idades, o volume e tamanho de vazios na zona de transição serão maiores do que na matriz de argamassa, conseqüentemente a zona de transição é mais fraca em resistência.

A zona de transição, geralmente o “elo mais fraco da corrente”, é considerada a fase de resistência limite do concreto. É devido a presença da zona de transição que o concreto rompe a um nível de tensão consideravelmente mais baixo que a resistência dos dois constituintes principais, pasta e agregado. Segundo YANG et al. (1998), a zona de transição crítica está em torno dos agregados graúdos e varia entre 25 a 70 μm .

A microestrutura da zona de transição, especialmente o volume de vazios e microfissuras presentes, têm grande influência sobre a rigidez ou o módulo de elasticidade do concreto. No material composto, a zona de transição serve de ponte entre os dois constituintes: a argamassa matriz e as partículas de agregado graúdo. Mesmo nos casos em que os constituintes individuais têm rigidez elevada, a rigidez do material composto pode ser baixa por causa de “pontes rompidas” (p.ex.: vazios e microfissuras na zona de transição), as quais não permitem transferência de energia, levando o concreto à ruptura com tensões menores que a resistência da pasta de cimento.

Devido a dificuldades experimentais, ainda há pouca informação sobre a zona de transição no concreto. Todavia, com base em uma descrição dada por MASO (apud MEHTA & MONTEIRO, 1994), pode-se ter algum entendimento das suas características estruturais acompanhando-se a seqüência do seu desenvolvimento a partir do momento em que o concreto é lançado.

Primeiro, em concreto recentemente compactado, um filme de água forma-se ao redor das partículas grandes de agregado. Isto pode levar a uma relação água/cimento mais elevada

na proximidade do agregado graúdo do que longe dele (p.ex., na matriz de argamassa). Em seguida, analogamente à matriz, os íons de cálcio, sulfato, hidroxila, e aluminato, formados pela dissolução dos compostos de sulfato de cálcio e de aluminato de cálcio, combinam-se para formar etringita e hidróxido de cálcio. Devido à relação água/cimento elevada, estes produtos cristalinos vizinhos ao agregado graúdo consistem de cristais relativamente grandes e, conseqüentemente, formam uma estrutura mais porosa do que na matriz de pasta de cimento ou na matriz de argamassa. Os cristais em placa de hidróxido de cálcio tendem a formar-se em camadas orientadas, por exemplo, com o eixo principal perpendicular à superfície do agregado. Finalmente, com o progresso da hidratação, o C-S-H pouco cristalizado e uma segunda geração de cristais menores de etringita e de hidróxido de cálcio começam a preencher os espaços vazios entre o reticulado criado pelos cristais grandes de etringita e de hidróxido de cálcio. Isto ajuda a aumentar a densidade e, conseqüentemente, a resistência da zona de transição.

Uma representação diagramática da zona de transição do concreto é apresentada na figura 4 abaixo:

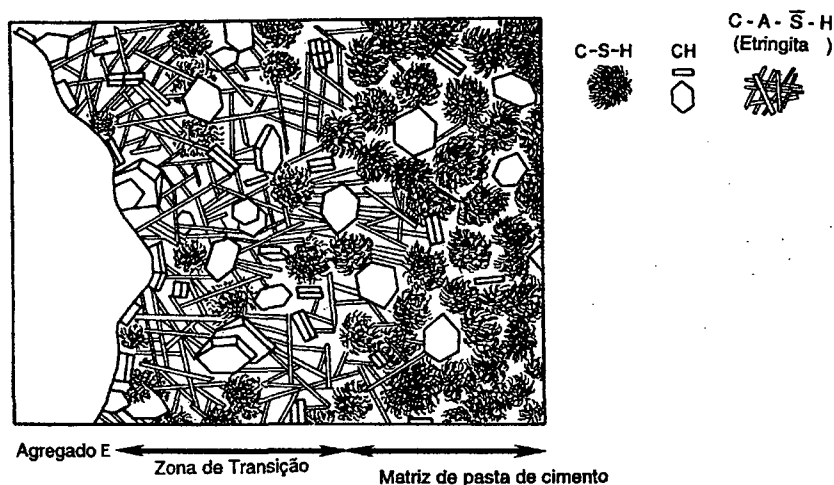


Figura 4 - Representação diagramática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Nas primeiras idades, especialmente quando ocorreu uma exsudação interna considerável, o tamanho e o volume de vazios da zona de transição são maiores do que no interior da pasta ou da argamassa. O tamanho e a concentração dos compostos cristalinos, tais como o hidróxido de cálcio e a etringita, são também maiores na zona de transição. Contudo, com o aumento da idade, a resistência da zona de transição pode tornar-se igual ou mesmo maior do que a resistência da matriz de argamassa (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Isto poderia ocorrer como resultado da cristalização de novos produtos nos vazios da zona de transição, através de reações químicas lentas entre os constituintes da pasta de cimento e o agregado, formando silicatos de cálcio

hidratado no caso de agregados silicosos, ou carboaluminatos hidratados em caso de calcário. Tais interações contribuem para a resistência porque tendem também a reduzir a concentração de hidróxido de cálcio na zona de transição. A presença de grandes cristais de hidróxido de cálcio na pasta tende a reduzir a resistência do concreto, pois possuem menor capacidade de adesão que o C-S-H, já que as forças de Van der Waals são mais fracas devido à menor área específica. Além disso as superfícies dos cristais servem como zonas preferenciais de fratura devido a tendência de crescimento dos cristais com direções cristalográficas orientadas em relação à superfície do agregado.

1.4.2 - Fatores relacionados à produção do concreto

1.4.2.1 - Porosidade da pasta hidratada

Como foi visto no item 1.3.1, nos concretos convencionais, a porosidade da pasta é o principal fator responsável pela resistência à compressão do concreto. Por sua vez a porosidade da pasta está principalmente relacionada aos seguintes fatores :

a) Relação água/cimento

A composição química, o teor de adições minerais e a finura determinam a capacidade do cimento de formar os compostos que vão preencher os espaços entre os grãos de agregado, ocupados inicialmente pela mistura de água e cimento anidro. Logo, para um determinado cimento e idade de hidratação, a quantidade de água do concreto, ou seja, o volume de espaço não sólido existente, em relação ao volume de cimento disponível, será o principal fator determinante da porosidade. Esse número, chamado de relação água/cimento, normalmente calculado em massa ao invés de volume, é o principal parâmetro utilizado na dosagem de concreto, pois credita-se a ele a responsabilidade por 95 % das variações na resistência do concreto (BUCHER, 1983).

DUFF ABRAMS introduziu o conceito de relação água/cimento em 1918 (ABRAMS, 1925) ao publicar o primeiro método de dosagem de concreto em que a resistência não era explicada pela interação entre os grãos dos agregados, como se pensava na época, mas sim pelo espaço a ser preenchido pelo cimento. ABRAMS, que também introduziu o conceito de módulo de finura para exprimir em um só número a distribuição granulométrica do agregado, demonstrou pelo resultado de 50.000 testes, que para um determinado cimento e conjunto de agregados, a resistência à compressão do concreto segue uma curva que pode ser expressa pela

seguinte forma :

$$f_{cj} = \frac{A}{B^{a/c}} \quad \text{onde;}$$

f_{cj} = Resistência do concreto na idade j ;

A e B = Constantes que dependem do cimento e agregados utilizados no concreto;

a/c = Relação água/cimento do concreto.

No trabalho ABRAMS explica, pela primeira vez, que a influência da granulometria do agregado se relaciona mesmo é com o consumo de água que, por sua vez, acarreta em variação da relação a/c do concreto, considerando um mesmo consumo de cimento pelo concreto. Demonstrou que não importa muito a proporção entre os outros materiais do concreto e que a resistência depende mesmo é da relação água/cimento.

Hoje, após o trabalho de POWERS (1968), sabe-se que a relação a/c explica a resistência do concreto porque ela é a maior responsável pela porosidade da pasta de cimento a certa idade. Mesmo assim, pela simplicidade do conceito introduzido por ABRAMS (1925), a relação a/c continua a ser o parâmetro mais importante num estudo de dosagem que se relaciona às propriedades do concreto endurecido.

b) Grau de hidratação da pasta de cimento

Como citado, a resistência do concreto para um determinado conjunto de materiais, depende principalmente da relação a/c e da idade. Na verdade, a idade está indiretamente representando o grau de hidratação do cimento utilizado no concreto. Esse fator está aqui colocado para lembrar que a hidratação é um processo lento e contínuo, que produz a redução da porosidade da pasta de cimento pela formação de um gel de silicatos hidratados. Mas o grau de hidratação não é um fator independente, mas sim consequência de vários outros fatores, como: Compostos presentes no cimento, finura, adições, relação a/c, temperatura, pressão e umidade.

c) Uso de aditivos

Hoje existe uma gama muito grande de opções de aditivos a serem misturados ao concreto com o objetivo de melhorar suas propriedades ou reduzir seu custo. Os aditivos variam amplamente quanto à composição química e muitos desempenham mais de uma função. Consequentemente, é difícil classificá-los de acordo com as suas funções. As várias funções dos aditivos são, entre outras: aumentar a plasticidade, fluidificar, incorporar ar, acelerar a cura, retardar a pega, impermeabilizar e provocar expansão (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Os aditivos plastificantes e superplastificantes agem reduzindo a relação a/c para produzir uma maior resistência ao concreto, para um mesmo teor de cimento ou para aumentar a fluidez. Os plastificantes são feitos de lignossulfonatos, ácidos hidroxí-carboxílicos ou polímeros hidrolizados e outros componentes secundários. Certas substâncias tensoativas são responsáveis por suas propriedades. Elas agem defloculando o cimento e formando minúsculas bolhas de ar estáveis que agem como rolamentos, diminuindo o atrito interno da pasta. Os aditivos superplastificantes, ou redutores de água de alta eficiência, consistem de sais sulfonados de melanina ou condensados de naftaleno-formaldeído, e agem de forma semelhante, mas com muito maior eficiência.

Os incorporadores de ar agem incorporando minúsculas bolhas de ar ao concreto e têm a principal função de propiciar uma maior resistência ao gelo e degelo. A incorporação de ar também melhora a trabalhabilidade do concreto mas, com a incorporação de ar (aumento da porosidade da pasta), há uma redução na resistência à compressão do concreto. A incorporação de ar também é usada para produzir concretos leves. Já no concreto massa, onde também não há necessidade de grande resistência, e o baixo consumo de cimento tende a produzir misturas de pouca plasticidade, os aditivos incorporadores de ar são muito usados, permitindo uma melhoria considerável na trabalhabilidade.

Retardadores são constituídos de carboidratos (monossacarídeos, polissacarídeos, ácidos hidro-carboxílicos, etc.), bem como de produtos inorgânicos (sais de chumbo, fosfatos, boratos, etc.). Retardam a osmose de água das faces dos grãos de cimento, agindo por defloculação e adsorção. Tem como função permitir lançar o concreto após um tempo muito maior que poderia ser feito sem o aditivo. É principalmente importante para as usinas produtoras de concreto, que têm que entregar o produto a longas distâncias. Como alguns desses aditivos são também redutores de água, para uma mesma proporção cimento: agregados, eles tendem a produzir concretos de resistência à compressão mais elevada.

Os aceleradores de endurecimento mais eficazes são feitos à base de cloreto de cálcio. Aceleram fortemente as reações iniciais de hidratação e endurecimento, especialmente do C_3S . Em dosagens superiores a 2 % da massa do cimento, trazem um grande risco de corrosão às armaduras. Com relação à resistência à compressão, ela pode ser aumentada de 30 a 100 % aos três dias de idade, mas provoca uma sensível redução na idade de 28 dias.

d) Adensamento

O adensamento do concreto, que geralmente é feito através do uso de equipamentos mecânicos denominados vibradores, tem a função de eliminar as bolhas de ar aprisionadas no

concreto e fazer com que a mistura ocupe todos os espaços vazios da fôrma. Pela eliminação das bolhas de ar, se diminui a porosidade. Consequentemente a vibração desempenha um papel importantíssimo na resistência do concreto (COUTINHO, 1973).

Tanto a defasagem como a amplitude de vibração, dependem das dimensões das partículas, ou seja, a cada dimensão de partícula da mistura corresponde uma freqüência própria que entra em ressonância com o aparelho vibratório. O ideal seria ter um aparelho que conseguisse imprimir diversas freqüências sobrepostas que permitisse estender o efeito de agitação a uma gama extensa de grãos. Como isso na prática não é possível, a vibração deve ser feita com aparelhos que produzam freqüências e amplitudes adequadas à dimensão das partículas do concreto (COUTINHO, 1973). A tabela 4 mostra as maiores dimensões das partículas que conseguem entrar em vibração em função da freqüência que são solicitadas.

Tabela 4 - Maiores dimensões de partículas que entram em vibração em função da freqüência com que são solicitadas (L'HERMITÊ apud COUTINHO, 1973)

Freqüência (ciclos/minuto)	Diâmetro (mm)
600	300
1500	60
3000	15
6000	4
12000	1

A quantidade de concreto que se consegue adensar por meio de um vibrador depende de sua potência e da trabalhabilidade do concreto. Por meio de agulhas com 45 mm de diâmetro, pode-se vibrar de 1 a 4 m³ de concreto por hora. No caso de agulhas pneumáticas com 100 mm de diâmetro, vibram-se até 20 m³ por hora. Em igualdade de natureza do concreto, o raio de ação do vibrador depende, além da freqüência e da amplitude, do diâmetro da agulha do vibrador. A freqüência ótima de vibração de uma agulha varia com seu diâmetro. A tabela 5 mostra as freqüência recomendadas em função do diâmetro da agulha.

A elevação da freqüência acima deste limite não aumenta a eficiência da agulha vibratória ou a qualidade do concreto vibrado, apenas faz crescer as cargas mecânicas sobre os componentes do vibrador, aumentando o consumo de energia e o ruído produzido. O tempo insuficiente de vibração acarreta em maior porosidade e o excesso de tempo causa segregação dos materiais, ambos provocando diminuição da resistência mecânica.

Tabela 5 - Frequência recomendada em função do diâmetro da agulha (L'HERMITÊ apud COUTINHO, 1973)

Diâmetro da agulha (mm)	Frequência (ciclos / minuto)
25 a 35	24000 a 18000
35 a 50	18000 a 15000
50 a 75	15000 a 12000
75 a 125	12000 a 9000
> 125	9000 a 6000

e) Consistência

A consistência do concreto, geralmente medida através do ensaio de abatimento do tronco de cone (NBR 7223, 1982), também pode contribuir com a diminuição da resistência do concreto. MEHTA & MONTEIRO (1994) citam uma experiência realizada em laboratório em que foram dosados concretos com relação a/c constante e igual a 0,6 mas a proporção agregado graúdo/miúdo e o teor de cimento na mistura do concreto foram progressivamente elevados de modo a aumentar a consistência de 50 para 150 mm no ensaio de abatimento do tronco de cone. Como resultado houve aproximadamente 12 % de redução na resistência média à compressão aos 7 dias de idade, de 23 para 20 MPa.

1.4.2.2 - Agregados

a) Distribuição granulométrica, substâncias deletérias e absorção

Os agregados podem ser classificados como naturais ou artificiais. Agregados naturais são aqueles utilizados como encontrados na natureza, sem nenhum tratamento especial a não ser a lavagem com água, ou seja, a areia natural, usada como agregado miúdo e o seixo rolado, usado como agregado graúdo. Os agregados artificiais, ou seja, areia artificial e pedra britada, são aqueles produzidos pela britagem de rochas seguida de peneiramento. São classificados de acordo com a dimensão máxima característica e distribuição granulométrica (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Para concretos de baixa resistência (< 40 MPa), a origem do agregado geralmente não tem muita influência na resistência à compressão do concreto. A influência maior geralmente está ligada ao maior consumo de água pelo concreto, em função da dimensão máxima característica, forma e distribuição granulométrica, que produz um maior consumo de cimento para uma mesma resistência, ou uma diminuição na resistência para uma mesma composição

entre cimento e agregados. Os agregados com elevados índices de absorção, em geral agregados porosos para concreto leve, por absorverem água do concreto, alteram a trabalhabilidade da mistura e, ao mesmo tempo, reduzem a relação a/c da pasta, melhorando em certos casos o seu desempenho. Mas com relação aos concretos normais, quase sempre a absorção das britas e dos seixos utilizados não produzem efeitos significativos nem à trabalhabilidade nem à resistência do concreto.

Os agregados miúdos naturais, por possuírem formas arredondadas e terem boa distribuição granulométrica, geralmente produzem argamassas de melhor trabalhabilidade que com areia artificial. Quando a areia é muito fina, a composição com areia artificial pode ser uma boa solução. Atenção especial deve ser dada à verificação de possível presença de material deletério no agregado miúdo (argila, material pulverulento, carvão, matéria orgânica, etc.), que pode comprometer a resistência do concreto.

b) Forma, dimensão máxima característica e textura

A forma dos agregados graúdos (DIAZ, 1990) e sua dimensão máxima característica (SAAD et al., 1983) afetam significativamente a resistência à compressão do concreto. Como a ruptura em concretos de baixa resistência geralmente se dá pela formação de fissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, a dimensão maior do agregado contribui bastante para a propagação das fissuras, diminuindo a resistência do concreto à compressão. Agregados de formas alongadas e discóides dão concretos de menor resistência para uma mesma relação a/c. Os melhores agregados são aqueles que possuem formas próximas à cúbica, pois propiciam boa ancoragem, dando boa resistência, sem diminuir a trabalhabilidade do concreto fresco. A textura é também muito importante para a resistência, especialmente em se tratando de resistência à tração do concreto. Agregados naturais, por possuírem superfícies mais lisas, propiciam pior ancoragem, diminuindo a resistência.

c) Origem mineralógica

A origem mineralógica geralmente não é levada em consideração nos concretos convencionais, a não ser quanto à reação álcali-agregado, que pode causar a desagregação do concreto devido à forte expansão provocada por essas reações. Considera-se, neste caso, que a aderência da pasta de cimento ao agregado se dá apenas por ancoragem e, por isso, não deveria haver influência da origem mineral na aderência da pasta com o agregado. Porém, pesquisas mais recentes têm demonstrado que existe formação de diferentes compostos na zona de transição (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Experiências feitas no Brasil indicam ainda que a

resistência à tração pode ser particularmente afetada pela composição mineral do agregado (MACEDO et al., 1988). No caso de concretos de resistências mais elevadas, especial atenção deve ser dada à resistência do próprio agregado. Agregados de rochas sedimentares como calcários e arenitos podem ter resistências à compressão tão baixas quanto 96 MPa e 48 MPa, respectivamente (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

1.4.3 - Fatores externos à mistura (Cura do concreto)

1.4.3.1 - Tempo e temperatura

Como a resistência do concreto depende de reações químicas que se processam aos poucos, logicamente o tempo é um dos fatores importantes na resistência. Sempre que se fala em resistência, obrigatoriamente têm-se que se referir à idade de cura. Se não for feita nenhuma referência, supõe-se que está se referindo à idade de 28 dias.

A temperatura do ambiente é também um fator importantíssimo a afetar a resistência. Primeiro, porque as reações químicas de hidratação são aceleradas pelo aumento da temperatura, gerando ainda mais calor de hidratação. Segundo, porque a dilatação e retração térmica, devido a grandes gradientes de temperatura ambiente, podem causar fissuras consideráveis.

Em peças de grandes dimensões, como é o caso do concreto massa, o problema da retração térmica é ainda mais grave porque o comprimento de dilatação ($\Delta L = \alpha.L.\Delta T$) depende do comprimento da peça e do gradiente de temperatura entre o concreto e o meio exterior. No concreto de alta resistência o problema também é muito acentuado devido ao maior teor de cimento utilizado em relação aos concretos usuais, gerando também grandes gradientes de temperatura.

1.4.3.2 - Pressão

Na fabricação de peças pré-moldadas de concreto, e também do concreto celular, a utilização de câmaras de autoclave são muito utilizadas com o objetivo de acelerar a cura e aumentar a resistência final. A associação de temperatura e pressão gera reações entre os compostos de cimento e o pó de rochas silicosas (ou areia), que são adicionadas às misturas, que não aconteceriam se não fosse essa combinação de tempo e temperatura. Estudos comparativos entre a cura em condições normais e a cura em autoclave, utilizando cimento Portland comum, mostram que o melhor desempenho é obtido com a combinação de temperatura e pressão em

torno de 200 °C e 1,6 MPa, quando a resistência é aumentada em torno de 100 % em 5 horas e em 50 % após 72 horas (AKAIA & SUDOH apud TANGO, 1983).

1.4.3.3 - Umidade

A resistência do concreto se dá pela reação do cimento com a água. Se, para confeccionar-se uma mistura de concreto trabalhável, quase sempre é colocado um excesso de água, é de se pensar que a perda de água por evaporação deveria causar um aumento na resistência devido à redução da relação a/c. Aliás, é isso que acontece quando é utilizado o sistema de adensamento a vácuo onde, ao mesmo tempo, retira-se parte do excesso de água e provoca-se o adensamento da massa (PETRUCCI, 1993). Mas, neste caso, a retirada da água é feita antes de iniciada a pega do concreto. Após o início de pega e conseqüente início de solidificação, a evaporação é também acompanhada por retração e conseqüentemente pode haver fissuração, diminuindo assim a resistência mecânica. Por esse motivo, é indispensável que o concreto seja curado, protegido por uma atmosfera úmida, ou que a umidade seja mantida através de película protetora que impeça a evaporação da água de amassamento.

1.5 – O ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO CONVENCIONAL

1.5.1 – Princípios fundamentais dos métodos de dosagem

Cada obra tem suas próprias particularidades que a faz singular com relação às características necessárias ao concreto para a moldagem de suas peças estruturais. A resistência mecânica está ligada ao projeto estrutural que, por sua vez, reflete exigências impostas pelo projeto arquitetônico. A consistência necessária ao concreto fresco é função da maior ou menor dificuldade de lançá-lo e adensá-lo devido às dimensões das fôrmas, equipamentos disponíveis, acessibilidade ao ponto de concretagem e outras dificuldades. A máxima permeabilidade (máxima relação a/c) e a resistência aos meios agressivos (utilização de aditivos, tipo de cimento, etc.) depende das condições de exposição aos agentes agressivos que a estrutura estará sujeita durante sua vida útil, e do tempo de vida útil que dela se espera.

A dimensão máxima característica do agregado do concreto depende da dimensão mínima da fôrma e entre as barras de armadura que, por sua vez, dependem dos projetos de arquitetura e estrutura. O conjunto de materiais da mistura é função também da disponibilidade

de materiais de qualidade próximos ao local da obra de modo a propiciar um concreto econômico (SOBRAL, 1971).

Como se verifica, são várias as exigências ao concreto que o engenheiro precisa estudar para encontrar a "dose" adequada de cada material componente. Segundo PRISZKULNIK (1977), constitui objetivo da dosagem do concreto, a recomendação da proporção adequada de aglomerante, agregados miúdo e graúdo, água, e eventualmente aditivos, visando a obtenção de um concreto que:

- Quando fresco, seja trabalhável e mantenha a sua homogeneidade nas etapas de sua produção (mistura, transporte, lançamento e adensamento);
- Quando endurecido, apresente, na idade especificada, as propriedades exigidas no projeto estrutural, e a aparência estabelecida no projeto arquitetônico;
- Seja durável, isto é, pelo menos mantenha as suas propriedades ao longo da vida útil prevista para a estrutura, resistindo a eventuais efeitos danosos oriundos de reações entre os seus componentes e das ações físicas e químicas do meio;
- Seja econômico.

Muitos pesquisadores têm tentado exprimir todas as variáveis que influenciam as propriedades desejáveis do concreto em uma única expressão matemática (CAMARGO, 1977). Porém, a diversidade de métodos de dosagem existentes, havendo em todos eles a necessidade de comprovação experimental da trabalhabilidade e da resistência mecânica, demonstra que ainda há muito que caminhar nesse campo.

De certa forma, o estudo de dosagem consiste em equilibrar as características contraditórias que um concreto deve ter, para que possua ao mesmo tempo, as qualidades mecânicas requeridas e a trabalhabilidade adequada à obra. HELENE & TERZIAN (1995) resumem em um quadro de maneira muito clara o sentido de evolução dos diversos parâmetros de dosagem em função da trabalhabilidade, da resistência e do custo. Esse quadro é reproduzido na tabela 6.

INGE LYSE publicou em 1931 sua contribuição ao estudo da dosagem dos concretos, demonstrando que, dentro de certos limites, é possível considerar a massa de água por unidade de volume de concreto como a principal determinante da consistência do concreto fresco, qualquer que seja a proporção dos demais materiais da mistura. Essa verdade se verifica sempre que sejam mantidos materiais de mesma natureza, com grãos de mesma forma, textura e dimensão característica.

Tabela 6 - Sentido de evolução de diversos parâmetros da dosagem em função da trabalhabilidade, da resistência mecânica e custo (HELENE & TERZIAN, 1995).

Parâmetros de dosagem do concreto	Concreto fresco	Concreto endurecido	Para redução do custo
	Para uma boa trabalhabilidade	Para uma boa resistência	
Granulometria do agregado miúdo	de preferência fina	de preferência grossa	grossa
Relação grão / miúdo	a diminuir	a aumentar	a maior possível
Consumo de água	a aumentar até certo ponto	a diminuir	a aumentar
Granulometria total	preferível contínua	preferível descontínua	a disponível
Dimensão máxima característica do agregado	de preferência média	de preferência pequena	a maior possível
Geometria do grão de agregado grão	de preferência esférica (pedregulho)	de preferência irregular (brita)	esférica (pedregulho)

PETRUCCI (1993) apresenta um gráfico mostrando que, variando o traço de 1:3 para 1:9, em proporções usuais, mantêm-se praticamente constante a quantidade total de água empregada. Esse gráfico é reproduzido na figura 5, com a introdução dos teores de argamassa α , das relações areia/materiais secos total ($a/(1+m)$) e das relações areia/ agregado total (a/m) para cada traço. Nota-se que no exemplo colocado por PETRUCCI, o teor de argamassa é variável com o traço, mas a relação areia/agregados é mantida constante.

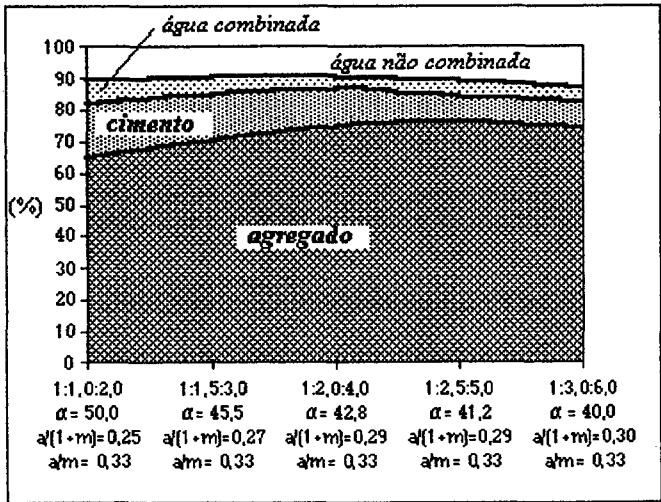


Figura 5 - A porcentagem de água/materiais secos (H) é praticamente independente do traço para um mesmo abatimento (Adaptado de PETRUCCI, 1993)

A Lei de LYSE é base para o início do estudo de trabalhabilidade dos concretos em

praticamente todos os métodos de dosagem. DAFICO (1997) faz uma descrição de alguns dos principais métodos de dosagem de concreto convencional, destacando os princípios básicos adotados por cada método para encontrar a resistência à compressão e a trabalhabilidade desejada. Todos esses métodos adotam como princípio básico que a consistência do concreto depende fundamentalmente do volume de água disponível por unidade de vazios deixados pelos agregados e que a resistência à compressão é regida pela Lei de ABRAMS.

No método do ACI (MEHTA & MONTEIRO, 1994), após estimativa inicial dos volumes dos materiais com auxílio de tabelas, é feita uma mistura experimental quando a trabalhabilidade é verificada quanto ao abatimento requerido e também é verificado visualmente se não há tendência à segregação ou exudação. Se a trabalhabilidade não for adequada, são feitas novas misturas com as mesmas quantidades de água e cimento, alterando-se as quantidades e proporções entre agregado graúdo e miúdo. Dessa forma, o proporcionamento da pasta mantém-se constante e o ajuste de trabalhabilidade é feito pela alteração no teor de argamassa.

No Método da ABCP (RODRIGUES, 1995) que é derivado do ACI, a água estimada nas tabelas é verificada experimentalmente sem a preocupação de variar-se a relação a/c. Posteriormente, mantendo-se a relação a/c inicialmente estimada em função da resistência desejada, o volume de areia é recalculado e nova mistura experimental é feita quando novo ajuste de trabalhabilidade é alcançado do mesmo modo proposto pelo Método do ACI, isto é, variando-se a proporção entre areia e brita sem alterar-se o proporcionamento da pasta.

No Método EPUSP/IPT (USP, 1987; HELENE & TERZIAN, 1995), um teor de argamassa seca ideal é determinado experimentalmente e mantido fixo para outras três misturas. O controle da trabalhabilidade é feito pela variação dos teores de cimento e água do concreto, desde que mantido o teor de argamassa seca constante. Ou seja, para o ajuste de trabalhabilidade, variam-se os teores de pasta e de argamassa úmida.

No Método do INT (CARNEIRO, 1937; PETRUCCI, 1993), procura-se, em função dos agregados disponíveis, determinar a proporção entre cimento:agregados que dê a distribuição granulométrica que mais se aproxime de uma das curvas granulométricas ideais, adaptadas de BOLOMEY por LOBO CARNEIRO para os Gnaisses do Rio de Janeiro, para um volume inicialmente estimado de água. Faz-se uma mistura experimental e determina-se um volume de água que dê o abatimento desejado. Tendo-se então um novo volume estimado para a água, e estimando-se a relação a/c necessária, determina-se nova composição cimento:agregados totais de forma a melhor aderir às curvas granulométricas ideais. Vê-se que, para manter as misturas dentro das composições granulométricas ideais, ao aumentar-se a quantidade de cimento do concreto é necessário diminuir a proporção de areia, ou então usar uma areia com menores

teores de finos.

No Método do ITERS (PETRUCCI, 1993), considera-se que o teor ótimo de areia é aquele que produz um valor mínimo da relação água/materiais secos para alcançar-se o abatimento requerido. Este valor mínimo no teor de água é determinado experimentalmente, variando-se o teor de areia em várias misturas. É um método que tende a encontrar proporções econômicas, com um mínimo de consumo de cimento para determinada resistência mecânica. Entretanto, pode acontecer que, pelo reduzido teor de argamassa, o concreto na prática não seja bem trabalhável apesar de possuir o abatimento requerido.

O Método Cubano (DIAZ, 1990) se diferencia de outros métodos principalmente por levar em consideração a forma dos agregados graúdos, o que auxilia na escolha de materiais que venham a propiciar maior economia de cimento. Nele, o controle da trabalhabilidade é feito adicionando-se água numa mistura inicialmente estimada em função dos agregados, da trabalhabilidade desejada e da resistência requerida, até se encontrar o abatimento desejado. Encontrado o teor de água necessário, aumenta-se ou diminui-se o teor de cimento para que o traço possua uma relação a/c que dê a resistência requerida, diminuindo-se ou aumentando-se o teor de agregados, sem alterar-se as proporções entre agregados graúdo e miúdo. Vê-se que o método considera importante obter uma distribuição granulométrica ideal dos agregados, e que, desde que não haja variação no teor de água, a variação nos teores de pasta e argamassa úmida não alteram a trabalhabilidade do concreto.

1.5.2 – O Método de Dosagem EPUSP/IPT

1.5.2.1 – Introdução

Atualmente o método conhecido como Método EPUSP/IPT (USP, 1987; HELENE & TERZIAN, 1995) é provavelmente o mais utilizado no Brasil para estudo de dosagem do concreto de cimento Portland convencional. A seguir, é feita uma descrição sucinta do Método EPUSP/IPT, apontando seus fundamentos básicos, os principais requisitos de projeto considerados, os ensaios preliminares necessários, e as etapas do estudo de dosagem.

1.5.2.2 - Fundamentos básicos

- A resistência do concreto depende fundamentalmente do tipo e classe do cimento utilizado e da relação a/c do concreto, desde que tenha trabalhabilidade adequada;

- A consistência do concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone, depende fundamentalmente do volume de água disponível por unidade de volume de vazios deixados pelo agregado graúdo do concreto que, por sua vez, depende da dimensão máxima característica do agregado e de sua forma.

- O teor ideal de argamassa da mistura depende fundamentalmente do volume de vazios deixados pelo agregado graúdo no concreto (que depende da dimensão máxima característica e distribuição granulométrica) e da capacidade de "lubrificação" da argamassa (que depende das características do cimento e areia). Esse teor de argamassa ideal, que é independente da relação a/c do concreto, é melhor determinado experimentalmente, pela aparência do concreto fresco no abatimento desejado, e ao demonstrar boa estabilidade da massa.

- A lei de LYSE se adapta relativamente bem às situações dos concretos normais. Considera-se que, mantendo-se constante o teor de argamassa do concreto para traços (m) com diferentes relações a/c , haverá pouca variação na relação água / materiais secos necessária para manter o mesmo abatimento. O método usa uma regressão linear aos mínimos quadrados, para encontrar uma reta que correlacione " m " com " a/c " ($m = k_3 \cdot a/c + k_4$), com o objetivo de montar o diagrama de dosagem.

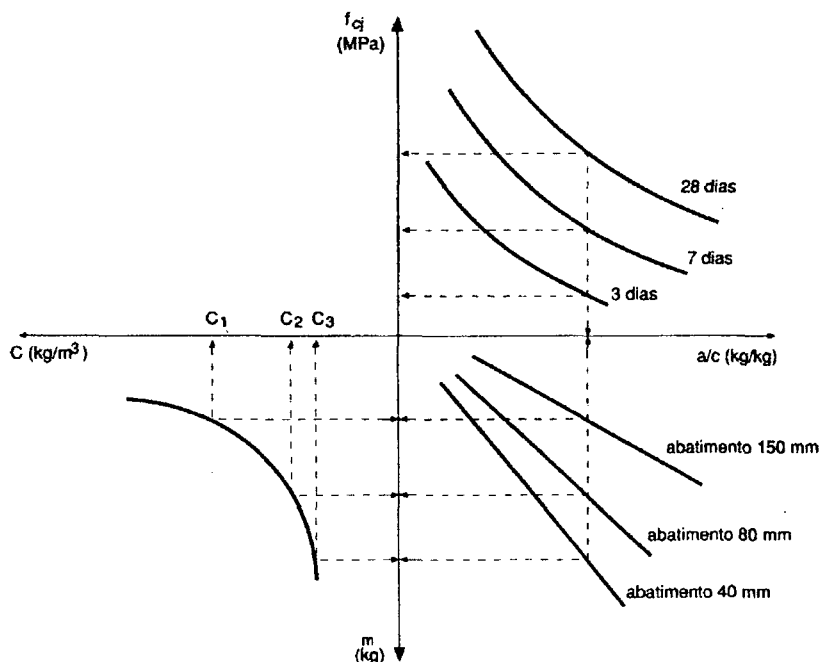


Figura 6 - Diagrama de Dosagem do Método EPUSP/IPT (HELENE & TERZIAN, 1995)

- Pode ser construído um diagrama único de dosagem para um dado conjunto de materiais, onde os parâmetros resistência à compressão " f_{cj} ", traço " m " e consumo de cimento

por metro cúbico de concreto "C" são plotados em função da relação a/c. Isso facilita a imediata posterior obtenção do traço adequado de qualquer concreto com resistência à compressão no intervalo considerado pelo diagrama. A figura 6 ilustra o Diagrama de Dosagem do Método EPUSP/IPT.

1.5.2.3 - Principais requisitos de projeto

- Resistência característica à compressão do concreto;
- Relação a/c máxima em função da agressividade do meio;
- Abatimento pelo ensaio do tronco de cone;
- Dimensão máxima característica do agregado.

1.5.2.4 - Dados preliminares necessários

- Conhecimento do tipo e classe do cimento a ser utilizado;
- Avaliação visual do tipo de agregado a ser utilizado e da dimensão máxima característica, para se ter uma primeira estimativa da relação água/ materiais secos.

1.5.2.5 - Etapas da dosagem

- Ensaio preliminares (simples avaliação visual);
- Estimativa de uma relação água/materiais secos relativamente próxima do valor que proporcionará a trabalhabilidade adequada a um traço 1:5 (essa estimativa não é necessária mas facilita o estudo de trabalhabilidade);
- Mistura experimental do traço 1:5, adotando-se um baixo teor de argamassa, e colocando água aos poucos até que se obtenha a consistência desejada. Avalia-se a adequação do teor de argamassa da mistura, experimentando a coesão da massa e estabilidade, usando da experiência que o tecnólogo de concreto possui. Se o teor de argamassa não estiver bom, coloca-se mais areia, mais cimento, e acrescenta-se mais água, mantendo-se o traço 1:5, até obter-se novamente a consistência desejada. Avalia-se mais uma vez o teor de argamassa, repetindo o procedimento até que se obtenha o teor adequado. A relação água / materiais secos encontrada passa a ser o valor estimado para todas as misturas, e o teor de argamassa é fixado para todos os traços;
- São feitas 3 misturas de traços 1:3,5 , 1:5 e 1:6,5 , com o teor de argamassa encontrado,

acrescentando-se água aos poucos em cada mistura, até se encontrar o abatimento desejado. Moldam-se então corpos-de-prova para ensaio à compressão na idade de controle;

- Com os valores da resistência obtida nos ensaios dos corpos-de-prova, e dos valores de m em função de a/c , constrói-se o diagrama de dosagem. A curva de consumo de cimento em função do traço também é obtida, após a determinação experimental da massa específica do concreto fresco, utilizando-se a expressão conhecida como lei de MOLINARI:

$$C = 1000 / (K_d + K_e \cdot m), \quad \text{onde:}$$

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto;

m = relação agregados / cimento em kg/kg;

K_d e K_e = constantes que dependem dos materiais e do abatimento do concreto.

CAPÍTULO II

O CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

2.1 – UM NOVO MATERIAL ESTRUTURAL

Concreto de Alto Desempenho é um concreto de cimento Portland produzido com materiais e condições especiais de forma a gerar um concreto com propriedades físicas e químicas muito superiores aos concretos convencionais. Segundo NEVILLE (1997), o nome “Concreto de Alto Desempenho” tem sabor de propaganda de um produto que se afirma ser novo. Um nome anterior era “Concreto de Alta Resistência” mas, em muitos casos, a alta durabilidade é a propriedade necessária, embora, em outros casos, seja o módulo de elasticidade (também chamado de módulo de deformação ou módulo de Young) a característica mais importante.

Quanto à resistência à compressão, NEVILLE (1997) afirma que a conotação da expressão “Alta Resistência” mudou significativamente com o tempo. Há algum tempo, 40 MPa era considerado um valor alto. Mais tarde, 60 MPa se tornou referência para um valor alto de resistência. Neville considera como sendo de alta resistência concretos com resistência à compressão superior a 80 MPa.

MEHTA & MONTEIRO (1994) utilizam-se do valor 40 MPa de resistência à compressão como linha divisória entre concretos convencionais e concretos de alta resistência. Utilizam-se de dois argumentos formulados por SHAH (apud MEHTA & MONTEIRO, 1994) para justificar sua definição de concreto de alta resistência como todo concreto com resistência superior a 40 MPa:

- I. *A maioria do concreto convencional está na faixa de 21 a 42 MPa. Para produzir concreto com mais de 42 MPa, são necessários controle de qualidade severo e mais cuidado na seleção e na dosagem dos materiais (plastificante, aditivos minerais, tipo e dimensão dos agregados, etc.). Então, para distinguir esse concreto especialmente formulado, que tem uma resistência superior a 42 MPa, deve-se chamá-lo de alta resistência.*
- II. *Estudos experimentais mostraram que, em muitos aspectos, a microestrutura e as propriedades do concreto com resistência à compressão acima de 42 MPa são consideravelmente diferentes das do concreto convencional. Fornecendo este último a base para prática corrente do concreto (por exemplo, a equação empírica*

para a estimativa do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão), o projetista estará alerta, quando se trata de um concreto com mais de 42 MPa, que será considerado em uma classe diferente.

Não é só a alta resistência à compressão que faz do concreto de alta resistência um material de muito melhor desempenho estrutural. Devido à baixíssima porosidade do material, este tende a possuir ainda uma alta resistência aos mais diversos meios agressivos, tais como as águas contaminadas por efluentes industriais, a atmosfera urbana, a água do mar, ao desgaste por abrasão, etc. Isso tudo torna o concreto de alta resistência um material de muito maior durabilidade que o concreto convencional. Por possuir um melhor desempenho quanto à durabilidade e outras propriedades mecânicas, hoje o concreto de alta resistência, quando esta melhor performance geral está garantida, é designado de **Concreto de Alto Desempenho** (ou CAD). Modernamente, a alta resistência mecânica é considerada como sendo só mais uma das muitas de suas características de elevado desempenho.

Entretanto nem todo concreto de alta resistência necessariamente é um concreto de alto desempenho. Segundo MEHTA (1996) as quatro principais causas de deterioração do concreto são a corrosão da armadura de aço, ciclos de congelamento e degelo, reação álcali-agregado e ataque de sulfatos. O autor apresenta um modelo holístico de deterioração do concreto baseado na revisão de casos históricos. De acordo com o modelo, o concreto contém microfissuras descontínuas, e sua permeabilidade mantém-se negligenciável até a propagação das microfissuras e interligação destas com as fissuras da superfície. Carregamento e efeitos climáticos tais como ciclos de aquecimento e esfriamento, bem como umidescimento e secagem, facilitam a propagação de fissuras. Uma vez que as fissuras superficiais tornam-se interconectadas com a rede de microfissuras interna, os agentes de deterioração tais como água, ar, CO₂, íons cloreto e íons sulfato, passam a ser capazes de penetrar facilmente o interior do concreto.

Desse modo o modelo de MEHTA (1996) nos ensina que não é a resistência do concreto em si, mas os vazios e microfissuras, e qualquer outro fator que possa promover a propagação de fissuras sobre condições de serviço, que são cruciais para a durabilidade ou alta performance do concreto. O autor ainda alerta para o fato de que a alta resistência à baixas idades, a qual sob o ponto de vista da velocidade de construção é uma característica desejável, é também freqüentemente a causa principal da microfissuração.

Como alguns autores consideram como sendo de alta resistência somente concretos com resistência superior a 60 ou 80 MPa (NEVILLE, 1997), no presente texto, baseado na definição

de MEHTA & MONTEIRO (1994) de que concretos com resistência superior a 40 MPa possuem características significativamente diferentes do concreto convencional, será usada a expressão Concreto de Alto Desempenho quando se tratar de concreto projetado para alta durabilidade e resistência superior a 40 MPa, e Concreto de Alta Resistência em se tratando de mistura de muito baixa relação água/aglomerante, que necessita necessariamente a adição de superplastificante para se conseguir uma mistura trabalhável, mas que, eventualmente, pode não ser um concreto durável se tiver uma forte tendência não controlada de propagação de fissuras.

São muitas as vantagens do uso do CAD em relação ao concreto convencional. Pode-se, no entanto, dividi-las em dois grupos importantes. Vantagens advindas pela melhoria das propriedades estruturais e vantagens por possuírem maior durabilidade frente ao ataque químico ou desgaste mecânico. Os dois grupos de propriedades são muito importantes, mas, em termos econômicos, a durabilidade parece ser uma preocupação cada vez mais crescente entre os construtores.

MEHTA (1996) afirma que atualmente o termo concreto de alto desempenho é comumente usado na literatura para descrever misturas as quais possuem alta trabalhabilidade, alta resistência e baixa permeabilidade. O material é especificado para longo tempo de duração sob serviço das peças estruturais que têm que resistir a ambiente severo. Dentre um grande número de exemplos recentes de estruturas sujeitas a ambientes severos, projetadas para durabilidade em serviço de 100 anos ou mais, estão os pilares e vigas mestras da ponte Northumberland Strait no Canadá, e o revestimento de segmentos do túnel do canal entre a França e Reino Unido.

No Brasil, atualmente são raras as obras projetadas e executadas com concretos de resistência média superior a 30 MPa. Nos Estados Unidos, já nos anos 60, foram construídas obras em que parte delas foram utilizados concretos de resistência superior a 50 MPa. Porém, só a partir da década de 80 tornou-se praticável a produção comercial de concretos de resistência à compressão superior a 70 MPa (os quais têm uma relação água/cimento da ordem de 0,3 ou menos), devido ao advento dos aditivos superplastificantes para o concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Hoje existem obras no exterior construídas com concretos de até 120 MPa de resistência à compressão. Aqui ainda é pouco expressivo o número de obras com concretos de alta resistência.

O texto de NAWY (1996) afirma que o custo estimado para recuperação das estruturas em concreto convencional existentes nos EUA excede 6 trilhões de dólares. Estima ainda a necessidade de pelo menos 400 bilhões de dólares até a passagem do século 20 somente para a recuperação das autoestradas e do sistema de pontes em concreto nos Estados Unidos. Segundo

ele, novas construções, em reconhecimento a essas estatísticas, devem utilizar da nova tecnologia do concreto de alto desempenho, que possui qualidades as quais podem eliminar futuros custos de reabilitação das estruturas. Ainda, defendendo o uso do concreto de alto desempenho, NAWY lista 14 vantagens do uso do CAD em relação ao concreto convencional que compensam o custo mais alto do primeiro:

- I. Redução em tamanho das peças estruturais, resultando em aumento do espaço útil e redução do volume de concreto produzido, que é acompanhado pela economia em tempo de construção;
- II. Redução em peso próprio, que é acompanhado da economia na execução de fundações;
- III. Redução em área de fôrma, com a conseqüente redução em materiais e mão-de-obra para montagem de fôrmas, escoramento e desforma;
- IV. Capacidade de construção de edifícios de altura muito elevada com a conseqüente redução de custos em aquisição de terrenos em locais onde este custo seja muito alto;
- V. Maiores vãos e menor número de vigas para mesmas magnitudes de carregamento;
- VI. Redução na deformação das peças submetidas à compressão axial;
- VII. Redução no número de pilares, com conseqüente redução no número de elementos de fundação;
- VIII. Redução na espessura das lajes e das vigas que suportam as lajes. Este é o principal componente em peso e custo na maioria das estruturas;
- IX. Performance superior em serviço ao longo do tempo sob carregamento estático, dinâmico e fadiga;
- X. Baixos coeficientes de fluência e retração;
- XI. Maior rigidez como resultado de um módulo de elasticidade mais alto;
- XII. Maior resistência ao congelamento/degelo e ao ataque químico, significando menor propagação de trincas e aumento na durabilidade;
- XIII. Custo reduzido de manutenção e reparos;
- XIV. Menor depreciação do ativo em função da maior durabilidade.

2.2 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

2.2.1 – Vantagens estruturais de um concreto com alta resistência

Os benefícios diretos do uso de um concreto com alta resistência são numerosos. Em pilares, o aumento na capacidade de carregamento é proporcional ao aumento da resistência à compressão e, desse modo, a área da seção para uma mesma carga pode ser reduzida. Por outro lado, para uma dada dimensão de pilar e carregamento, uma redução acentuada de armadura pode ser feita pelo uso desse concreto. Esta redução em armadura situa-se em torno de 1% para cada 7 MPa de aumento na resistência do concreto (SWAMY, 1985).

Em vigas de concreto armado, como a capacidade de carga é limitada por uma dada percentagem da armadura de tração, um aumento na capacidade de carga somente é possível pelo simultâneo aumento na porcentagem de aço para que a zona de compressão de um concreto mais resistente seja totalmente mobilizada. Este aumento será eventualmente limitado pelo congestionamento das armaduras, mas isso pode ser solucionado pelo uso de cordoalhas ou pelo uso de aço de maior resistência. Por outro lado, para uma dada capacidade da viga, o tamanho da seção comprimida pode ser reduzido pelo uso de um concreto mais resistente.

Em peças protendidas, a capacidade de carga pode ser aumentada na proporção da resistência do concreto. Arcos e estruturas em cascas, as quais atuam principalmente à compressão, e estruturas em casca abaixo do solo, particularmente para carregamentos dinâmicos, podem também utilizar-se das vantagens do concreto de alta resistência. Estas são apenas umas poucas das muitas possíveis aplicações onde o aumento na resistência pode trazer vantagens imediatas, mas este é um material relativamente novo, e o surgimento de um novo material geralmente precede as idéias para as quais ele possa ser usado.

2.2.2 – Limitações estruturais e de projeto

Com a ênfase atual no critério de projetar em função da deformação, a resistência dos materiais não é o único critério para o projeto estrutural, e outras considerações como a rigidez elástica, fissuração, e deformação a longo prazo são todas necessidades a serem levadas em conta. Tais considerações podem revelar problemas estruturais quando do uso do concreto de alto desempenho. Em elementos de concreto armado, por exemplo, se vantagens são obtidas do aumento da resistência na redução da seção, deflexão e fissuração podem se tornar fatores críticos. Em colunas, requisitos como flambagem podem ditar a redução na dimensão das

colunas. Por outro lado, drásticas reduções na percentagem de aço podem realçar consideravelmente a retração e fluência, e a capacidade de transferência de carga do concreto para o aço.

DAL MOLIN & MONTEIRO (1996) mostram a necessidade de revisão da norma NBR 6118 (1978) de modo a contemplar os concretos de alta resistência. Os autores encontram uma equação para previsão do módulo de deformação a partir da resistência à compressão, para o intervalo de resistência à compressão de 20 a 90 MPa, cujos valores são bem menores que os previstos quando extrapola-se a faixa de resistência à compressão para a qual a NBR 6118 foi concebida.

SWAMY (1985) também demonstra sua preocupação ao afirmar que, se a alta resistência do concreto é derivada de um maior conteúdo de cimento que o usual, maior retração e fluência podem resultar, e isto deve ser necessariamente considerado em projeto. Entretanto, MEHTA & MONTEIRO (1994) afirmam, baseados nos trabalhos de CARRASQUILLO et al. (1981), que a quantidade de microfissuras no concreto de alta resistência, associada à retração, ao carregamento a curto prazo e à carga constante, é significativamente menor que no concreto convencional. Afirmam ainda, que a substancial diminuição da dependência em relação ao tempo do concreto de alta resistência, se comparado ao concreto convencional, explica em parte a grande redução da fluência nos concretos de alta resistência. GAMBALE et al. (1999) descrevem um trabalho mais recente, em que foram medidos os coeficientes de fluência a várias idades para um concreto de alto desempenho, um concreto convencional, um concreto massa e um concreto compactado a rolo, onde o concreto de alto desempenho apresentou coeficientes de fluência menores em todas as idades.

SWAMY (1985) afirma também, que o uso de aço de alta resistência pode ser necessário para aliviar o congestionamento das armaduras no CAD, e isto pode muito provavelmente resultar em maiores deflexões e mais fissuração. Outra consideração importante, afirma, poderia ser a possibilidade de ruína frágil e explosiva, sem adequada ductilidade na ruptura, e a redução na capacidade de carga na ruína. Estes são problemas reais que necessitam mais dados experimentais relacionados ao comportamento estrutural e experiência em projeto e construção usando o concreto de alto desempenho. São muitas as possíveis soluções para algumas dessas questões, como o uso de fibras para aumentar a ductilidade e, se econômica, cura em autoclave para redução da fluência.

2.3 – DURABILIDADE DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

2.3.1 – Corrosão eletroquímica

Segundo NEVILLE (1997), uma das principais propriedades do concreto de alto desempenho é a baixíssima permeabilidade. O fato de que este concreto tem uma estrutura particularmente densa na pasta de cimento hidratada, com um sistema de poros descontínuo, significa que esse concreto tem alta resistência ao ataque de agentes externos. Isso é particularmente verdade quanto ao ingresso de cloretos no concreto.

GJORV (1992) explica que o concreto de alto desempenho é caracterizado por uma baixa porosidade e uma microestrutura mais uniforme comparada com o concreto convencional, e isto indica uma maior resistência à penetração do dióxido de carbono e íons cloreto. Contudo, durante a produção do concreto, ambas, a microfissuração devida à retração plástica e a microfissuração devida à auto secagem (ou secagem autógena) podem representar problemas potenciais sob o ponto de vista da proteção contra a corrosão. Também, dependendo da quantidade de adição mineral usada, ambas, a reserva de alcalinidade e a habilidade da pasta de cimento de reter íons cloreto, podem ser afetadas.

Para um incremento da substituição do cimento por sílica ativa, a concentração dos íons K^+ e OH^- são substancialmente reduzidos. Entretanto, GJORV (1992) afirma que mesmo a substituição de mais de 20 % não causa redução no PH da pasta de cimento abaixo do valor de saturação da solução de hidróxido de cálcio que é de 12,5. Mesmo substituições maiores que 30% do cimento não causam declínio no PH da solução para menos que 11,5 , o qual é considerado ser o valor limite para manutenção de uma boa passividade para a armadura de aço.

Como correntes elétricas passam através do concreto na forma de íons carregados, é razoável supor que há uma relação próxima entre resistividade elétrica, concentração iônica e porosidade. O conteúdo de umidade do concreto é também um importante fator. Se o concreto estiver seco o bastante, a resistividade pode ser muito alta para permitir o transporte de íons e, desse modo, não irá ocorrer taxa significativa de corrosão.

2.3.2 – Resistência ao congelamento

Mesmo para o concreto convencional, a produção de uma mistura com um bom e estável sistema de ar incorporado, para uma maior capacidade do concreto em resistir a temperaturas congelantes, é normalmente um problema, mas na presença das altas dosagens de

superplastificante encontradas nos concretos de alta resistência, o estabelecimento de um bom e estável sistema de ar incorporado é ainda mais difícil. Para produção de um concreto de alta resistência, pode haver ainda um requerimento conflitante para a dosagem com incorporação de ar, que é a diminuição na resistência mecânica ao incorporar ar. Portanto, muita atenção deve ser dada em avaliar se um determinado concreto de alto desempenho, com alta resistência mecânica e alta resistência ao congelamento/degelo pode ser produzido sem a necessidade da incorporação de ar (GJORV, 1992).

2.3.3 – Resistência química

De acordo com BICZÓC (apud GJORV, 1992), a deterioração química do concreto pode ser classificada em três tipos de processos dependendo da reação química predominante que ocorre. Corrosão por lixiviação do concreto é um processo onde partes ou o todo de uma pasta endurecida de cimento é removida do concreto. Normalmente, é causada pela ação da água pura (baixa dureza carbonática) ou pelo conteúdo de ácido carbônico (H_2CO_3) na água. O segundo processo é a corrosão por reação de troca de cátions e pela remoção de compostos de rápida solubilidade da pasta de cimento endurecida. MEHTA & MONTEIRO (1994) explicam que, através da reação por troca de cátions, as soluções de cloreto de amônia e sulfato de amônia, que são comumente encontradas na indústria agrícola e de fertilizantes, são capazes de transformar os componentes da pasta de cimento em produtos altamente solúveis. O terceiro processo é a corrosão por expansão, principalmente devido à formação de novos e estáveis compostos na pasta endurecida de cimento. Este processo é principalmente o resultado do ataque de certos sais. Também a reação álcali-agregado causa expansão, quando o concreto é eventualmente destruído pela pressão de expansão. Para todos os processos de deterioração citados, a permeabilidade do concreto é o fator chave que governa a taxa de deterioração.

É interessante lembrar que o hidróxido de cálcio presente nas pastas de cimento é um constituinte facilmente solubilizável o qual é muito vulnerável ao ataque químico. Em soluções contendo sulfatos, o hidróxido de cálcio reage com os sulfatos para produzir gesso, o qual pode ainda reagir com os aluminatos para formar etringita. Ambas as reações são expansivas e podem causar desagregação. Portanto, as pozolanas normalmente usadas em concretos de alto desempenho são muito eficientes para redução do conteúdo de hidróxido de cálcio, tendendo, desta forma, a aumentar significativamente a resistência contra o ataque por sulfatos. Além da redução do hidróxido de cálcio, pozolanas tais como a sílica ativa também formam silicatos de

cálcio hidratados que são capazes de incorporar íons aluminatos, reduzindo assim a quantidade de alumínio disponível para formação de etringita (GJORV, 1992).

A presença de pozolanas como a sílica ativa pode também controlar a expansão causada pela reação álcali-agregado. Análises da água dos poros de pastas de cimento contendo sílica ativa têm demonstrado a habilidade da sílica ativa em reduzir rapidamente a concentração de álcalis na solução dos poros, fazendo com que não hajam álcalis disponíveis para a lenta reação álcali-agregado (DIAMOND apud GJORV, 1992).

2.3.4 – Resistência ao fogo

Segundo NEVILLE (1997), o concreto de alto desempenho tem baixa resistência ao fogo, porque a baixa permeabilidade não permite a saída do vapor formado pela água da pasta de cimento hidratada. DIEDERICHS et al. (apud GJORV, 1992) apresentam o resultado de uma perda de 30% da resistência à 150 °C, enquanto que para o concreto convencional sua resistência é mantida inalterada até temperaturas em torno de 350 °C.

2.3.5 – Resistência à abrasão

É muito boa a resistência à abrasão do concreto de alto desempenho, não somente devido à alta resistência do concreto, mas também devido à boa aderência entre o agregado graúdo e a matriz, que impede o desgaste diferencial da superfície (NEVILLE, 1997).

2.4 – MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

2.4.1 – Agregados

No concreto convencional, até três quartos do seu volume é ocupado pelos agregados. Não é surpreendente que a qualidade dos agregados seja considerada de grande importância nas suas propriedades. No caso do concreto de alto desempenho, a experiência tem mostrado que a qualidade do agregado é um dos principais fatores limitantes, tanto para a obtenção de boa trabalhabilidade como alta resistência.

Como a chave para uma alta resistência é uma baixa relação a/c, para a obtenção de uma mistura com adequada trabalhabilidade, que resulte em elevada resistência, é necessário haver

uma boa distribuição granulométrica. A forma dos agregados graúdos, a dimensão máxima característica e mesmo a origem mineralógica têm influência significativa na performance do concreto. GJORV (1992) afirma que, muito embora a mineralogia e petrografia do agregado graúdo determinem a resistência intrínseca do agregado, outros fatores como extração e britagem constituem importantes fatores. Durante esses processos, danos à microestrutura dos agregados podem ocorrer pela formação e desenvolvimento de microfissuras. Por esses motivos, o autor recomenda a utilização de uma dimensão máxima característica de 10 a 14 mm.

2.4.2 – Cimento e adições minerais

Tanto a composição química como mineral, bem como a distribuição do tamanho de partículas são importantes fatores a serem considerados na seleção de um cimento para o concreto de alto desempenho. Não só a consideração da resistência do cimento é importante na sua escolha. O tipo de cimento é também muito importante quanto à demanda de água e, conseqüentemente, quanto à trabalhabilidade da mistura. Os principais fatores que governam essas propriedades são o teor de C_3A e a finura do cimento. Outra consideração importante é a relação C_2S/C_3S que, quanto mais alta, tende a produzir melhores concretos, já que na hidratação do C_2S há menor liberação de $Ca(OH)_2$ para a pasta.

Nos Concretos de Alto Desempenho, em especial nos de mais alta resistência, devido ao grande consumo de cimento, deve haver uma preocupação adicional com relação ao calor de hidratação. O calor de hidratação pode ser reduzido utilizando-se para isso cimentos de baixo calor de hidratação e ainda pela substituição de parte do cimento por pozolanas. Além desse papel, as pozolanas são essenciais para melhoria da microestrutura da pasta e da interface pasta/agregado devido à formação de C-S-H através da reação da sílica da pozolana com o $Ca(OH)_2$ liberado na hidratação do cimento.

2.4.3 – Aditivos químicos

De maneira a reduzir suficientemente o conteúdo de água da mistura e ainda manter uma trabalhabilidade aceitável, altos teores de agentes redutores de água (superplastificantes) são utilizados. Superplastificantes são tensoativos aniônicos de massa molecular elevada derivados de formaldeídos sulfonados de naftaleno ou melanina. Quando usados em quantidades variando de 1 a 2 % em massa (sólidos) em relação à massa de aglomerante, produzem um poderoso efeito dispersante, de relativa curta duração, dos sólidos da pasta aglomerante (MEHTA &

AİTCIN, 1990). Além de superplastificante, também pode ser necessária a adição de retardadores de pega, quando há necessidade de aumentar o tempo para transporte e lançamento do concreto, e aditivos incorporadores de ar, para climas sujeitos à temperaturas congelantes.

A compatibilidade do cimento com os aditivos químicos, em especial os superplastificantes, é um fator que não pode ser relevado. AİTCIN & BAALBAKI (1995) explicam que, como muitos superplastificantes são à base de sais sulfonados, um teor elevado de gesso no cimento pode resultar em excesso de SO_3 na pasta, resultando em expansão devido à formação de etringita e, em muitos casos, resultando até na desagregação completa do concreto durante a cura.

2.5 – PRODUÇÃO, LANÇAMENTO E CURA DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

2.5.1 – Produção

Durante a mistura do concreto, atenção deve ser dada para a seqüência com as quais os materiais componentes são adicionados no misturador e, também, para a eficiência da mistura. Em particular, a taxa de colocação do aditivo e o momento de adição podem alterar a eficiência do aditivo e, conseqüentemente, a demanda de água da mistura (DODSON & FARKAS apud GJORV, 1992). O método padrão segundo MEHTA & AİTCIN (1990) é obter primeiro uma mistura homogênea do agregado graúdo com o miúdo na betoneira e então acrescentar os materiais aglomerantes seguidos pela água e o superplastificante. Uma idéia alternativa segundo os autores é produzir primeiro a pasta com superplastificante num misturador de alta velocidade e então adicionar os agregados.

Como parte da garantia da qualidade e do controle de qualidade da produção do concreto de alta resistência, é extremamente importante manter o controle dos materiais constituintes. Em particular, atenção especial deve ser dada à distribuição granulométrica e ao teor de umidade do agregado miúdo. Em concretos de baixa relação água/cimento, como é o caso de concretos de alta resistência, variações não controladas tão pequenas como 1 % no teor de umidade do agregado miúdo trarão um impacto muito maior na resistência se comparado a um concreto convencional, de maior relação água/cimento (GJORV, 1992).

TORALLES CARBONARI et al. (1998) fazem uma comparação da trabalhabilidade entre concretos de alto desempenho feitos com agregados úmidos e com agregados secos. Para

os concretos dosados com agregados secos a água a ser absorvida pelo agregado foi acrescentada às misturas de modo a obter-se concretos com mesmos teores absolutos de água. Interessante verificar que as misturas realizadas com agregados secos proporcionaram misturas mais trabalháveis, provavelmente devido à sobra de água enquanto esta não é absorvida pelo agregado, sem prejuízo na resistência à compressão. Em função disso os autores recomendam para a dosagem do CAD a utilização de agregados com teores de umidade baixos, de preferência menores que 2%.

2.5.2 – Trabalhabilidade e lançamento

GJORV (1992) afirma que, para o concreto de alta resistência, a baixa relação a/c mais a adição de sílica ativa e superplastificantes afetam as propriedades do concreto fresco de tal maneira que nem o comportamento “estático” nem o “dinâmico” podem ser comparados com o concreto convencional. Portanto, métodos convencionais como o Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone ou o Flow Table não predizem a adensabilidade da maneira usual. Os métodos convencionais são ainda válidos para dar uma indicação se o material está num estado plástico, altamente plástico ou fluido, mas eles não fornecem nenhuma informação sobre as propriedades de adensamento do concreto. Assim, concretos com conteúdos diferentes de sílica ativa e superplastificantes podem ter mesmos valores de abatimento, mas adensabilidades muito diferentes.

De acordo com DE LARRARD (1995-a), é desejável que se fixe o abatimento do CAD em 210 ± 30 mm. Abaixo de 180 mm é difícil de estabilizar a consistência, o concreto é viscoso e pegajoso, e possui dificuldade de eliminação das bolhas de ar da superfície. Por outro lado, se o abatimento for maior que 240 mm, o concreto poder exibir segregação, e ainda não ser mais possível detectar, pela alteração do abatimento, qualquer possível excesso de água na mistura devido a algum erro durante a produção do concreto, um efeito muito mais prejudicial à resistência do CAD que do concreto convencional.

TORALLES CARBONARI et al. (1998) fazem algumas recomendações importantes para a produção de um concreto com trabalhabilidade adequada. Ressalta a importância de se fazer um controle rigoroso dos materiais componentes, observar o tipo de misturador e a sequência adequada de mistura dos componentes. Com relação à sequência de mistura, recomendam primeiro homogeneizar a pasta para posteriormente incorporar o esqueleto granular, adicionando o superplastificante em duas partes, uma na central e outra na obra. Como alternativa recomendam produzir uma mistura seca homogênea, adicionando a água e o superplastificante

posteriormente. Isto possibilitaria o deslocamento do tempo de eficácia do superplastificante, de modo que ele seja melhor aproveitado na obra e não no transporte rodoviário. Os autores ainda mostram como a mistura enérgica contribui para a perda de abatimento do concreto, sugerindo que a diminuição da velocidade de rotação do tambor do caminhão betoneira seria um modo de minimizar a perda de abatimento devido a esse fator.

2.5.3 - Cura

Quando o conteúdo de cimento do concreto se torna alto, em consequência da necessidade de muito baixas relações a/c, o desenvolvimento de calor de hidratação é aumentado, o que pode causar o risco de fissuração térmica e consequente diminuição de resistência e aumento na permeabilidade. A experiência mostra que a presença de pozolana, em substituição de parte do cimento, reduz substancialmente o calor de hidratação.

Para todos os concretos, uma cura apropriada é essencial para garantir o desenvolvimento de todo o potencial do material. GJORV (1992) afirma que a cura por água tem mostrado ser mais eficaz que o uso de lonas plásticas ou líquidos selantes.

2.6 – ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

2.6.1 – Introdução

Mesmo para o concreto convencional, a dosagem não é um processo fácil de controlar porque normalmente envolve um balanceamento de vários requerimentos conflitantes. Testes em laboratório devem ser feitos antes que uma mistura satisfatória seja obtida para um dado conjunto de materiais. Para o concreto de alto desempenho, especialmente para os de mais alta resistência, o proporcionamento dos materiais componentes se torna ainda mais difícil devido aos requisitos conflitantes de um conteúdo muito baixo de água e uma trabalhabilidade adequada (GJORV, 1992).

Tratando do concreto convencional MEHTA & MONTEIRO (1994) comentam “... *O proporcionamento dos materiais do concreto, também conhecido por dosagem do concreto, é um processo através do qual é obtida a melhor proporção entre cimento, agregados, água e aditivos para produzir um concreto que atenda a certas especificações prévias. Pelas razões expressas anteriormente, este processo é considerado mais uma arte que uma ciência. Apesar*

de muitos engenheiros não ficarem à vontade no trato de matérias que não possam ser transformadas num conjunto exato de números, com o entendimento dos princípios básicos e com alguma prática, a arte de proporcionamento das misturas de concreto pode ser dominada. Havendo oportunidade, o exercício desta arte é muito recompensador porque os efeitos da proporção dos materiais no custo e nas propriedades dos concretos, tanto quando frescos quanto após endurecidos, podem ser claramente vistos.”

Na literatura, vários procedimentos para a dosagem do concreto de alta resistência têm sido propostos. Em 1974, BLICK et al. (apud GJORV, 1992) publicaram algumas orientações gerais para a seleção da dimensão máxima do agregado. Eles também afirmaram que, para uma dada dimensão máxima característica do agregado, o teor de agregados finos pode ser reduzido devido ao alto teor de cimento nas misturas. Mais recentemente, MEHTA & AİTCIN (1990) propuseram um procedimento passo a passo baseado na fixação do teor de pasta em 35% em volume e tabularam as proporções das misturas dependendo da resistência desejada. Neste procedimento, a trabalhabilidade é controlada pelo uso de superplastificantes, o que na prática, segundo GJORV (1992), pode ser difícil.

ADDIS & ALEXANDER (1990) propuseram um outro método baseado na linha seguida pelo ACI para o proporcionamento do concreto. Também nesse método, mais ênfase é dada para aspectos dos agregados do que da pasta de cimento e, segundo GJORV (1992) a composição da mesma permanece ainda menos clara.

A seguir, são descritos resumidamente alguns métodos para estudo de dosagem de concretos de alta resistência, dando-se ênfase em mostrar os principais passos a serem seguidos em cada método e na interpretação dos fundamentos básicos de cada um. Alguns desses métodos demonstram certa preocupação com a durabilidade da mistura proporcionada e, por isso, são freqüentemente considerados como métodos de dosagem de concretos de alto desempenho.

2.6.2 – Método de estudo de dosagem proposto por ADDIS & ALEXANDER (1990)

O método de dosagem proposto por ADDIS & ALEXANDER (1990), para estudo de dosagem de concretos de baixa relação água/cimento, é uma adaptação do método do PCI – Portland Cement Institute que, por sua vez, é uma adaptação empírica do método do ACI – American Concrete Institute para concretos convencionais. Os autores se concentram em encontrar o volume ideal de agregado graúdo e de água como função característica dos agregados graúdo e miúdo. O texto não faz menção ao uso de pozolanas nem fala sobre requisitos de durabilidade do concreto.

Em resumo o método pode ser descrito pelos passos a seguir:

I – Determinação do módulo de finura dos agregados graúdo e miúdo e da massa unitária compactada do agregado graúdo;

II – Estimativa do volume de água do concreto. O autor não explica como isto é feito, mas supõe-se que é por experiência do tecnologista na dosagem com os materiais da região;

III – Uso de um dos gráficos construídos pelos autores para relação $a/c = 0,59$, cada um para uma faixa de módulo de finura do agregado graúdo, de onde, a partir dos valores do módulo de finura da areia e do volume estimado de água, estima-se o volume de agregado graúdo;

IV – Tendo-se já estimado o volume de água e o volume de agregado graúdo, e sendo a relação $a/c = 0,59$ para a primeira mistura, calcula-se, a partir destes valores, o volume de cimento e o volume de areia;

V – Faz-se uma primeira mistura experimental tomando-se o cuidado de colocar o agregado graúdo aos poucos até que se tenha o abatimento desejado. Pode ser preciso colocar menos ou mais agregado graúdo que o calculado. Dessa mistura obtêm-se o volume de água procurado;

VI – Com o volume de água encontrado experimentalmente, e utilizando o valor da relação $a/c = 0,59$, calcula-se o conteúdo de cimento. Com o gráfico anteriormente citado, em função do módulo de finura dos agregados e do volume de água, obtêm-se o conteúdo de agregado graúdo. O conteúdo de agregado miúdo é determinado a partir dos valores anteriores;

VII – Utiliza-se, em seguida, um outro gráfico construído pelos autores, onde existem curvas que correlacionam a relação a/c com o teor de agregado graúdo. Escolhe-se a curva a partir dos dados já determinados anteriormente, isto é, a relação $a/c = 0,59$ e o teor de agregado graúdo para esta relação a/c . Então, para determinar-se outras misturas de menor relação a/c , determina-se por este gráfico os teores de agregado graúdo para cada relação a/c . Qualquer que seja a relação a/c , a quantidade de água será a mesma.

VIII – Dosa-se as várias misturas e escolhe-se as que atenderem aos requisitos de resistência e trabalhabilidade, utilizando-se da adição de superplastificante para alcançar o abatimento de 75 mm. Para outros valores de abatimento, os autores informam que há necessidade de se construir outros gráficos para as determinações realizadas nas etapas III e VII.

Pela leitura do texto e observação do resumo esquematizado acima, pode-se observar que o método proposto baseia-se nos seguintes fundamentos básicos:

- No método do PCI, para relações a/c altas (concretos convencionais), o volume ideal de agregado graúdo é função do módulo de finura do agregado graúdo e da areia. Neste caso, para

os concretos convencionais, o teor de argamassa é constante para um dado conjunto de materiais, qualquer que seja a relação a/c, desde que seja concreto convencional;

- A quantidade de água ideal para um dado conjunto de agregados que proporciona determinado abatimento é independente da relação a/c. Logo, descobrindo-se o teor de água ideal para uma relação a/c = 0,59, têm-se o teor de água para várias outras relações a/c mais baixas;

- Para relações a/c baixas, ou seja, concreto de alta resistência, o volume de agregado graúdo é função do módulo de finura do agregado graúdo e do módulo de finura da mistura de agregado miúdo e cimento;

- Variando-se a relação a/c, há conseqüentemente variação no volume de agregado graúdo e, assim, o teor de argamassa é variável. Quanto menor a relação a/c, maior o teor de cimento e maior também o teor de agregado graúdo ideal. Assim, para misturas de menor relação a/c, maior será o teor de pasta e menor o teor de argamassa úmida.

2.6.3 – Método de estudo de dosagem proposto por MEHTA & AİTCIN (1990)

No método passo a passo proposto por MEHTA & AİTCIN (1990), os autores descrevem a seguinte seqüência:

I – Escolha de um conjunto de resistências para dosagem das misturas experimentais. Os autores chamam de graus de resistências A, B, C, D e E, que possuem os valores 65, 75, 90, 105, 120 MPa;

II – Estimativa dos teores máximos de água (tabela em função das resistências à compressão já citadas no item I);

III – Cálculo dos volumes de todos os aglomerantes com auxílio de uma tabela que apresenta o volume total de aglomerante em função das resistências (as mesmas já citadas no item I). Com o volume total de aglomerante para cada resistência, pode-se calcular os volumes de cimento e de pozolanas na proporção que se desejar estudar (por exemplo : cimento puro, 75 % de cimento mais 25 % de cinza volante, 75 % de cimento com 15 % de cinza volante e 10 % de sílica ativa);

IV – Determinação dos teores de agregados miúdo e graúdo para cada nível de resistência sendo sempre o teor em volume de agregados totais igual a 65 %. As relações volumétricas entre agregado miúdo/grauído para os concretos de graus de resistência A, B, C, D e E, são respectivamente, 2,00:3,00 , 1,95:3,05 , 1,90:3,10 , 1,85:3,15 , 1,80:3,20 ;

V – Cálculo das quantidades em massa dos materiais para todas as misturas iniciais a partir dos volumes calculados e das massas específicas;

VI – Mistura experimental controlando o abatimento com adição de superplastificante;

VII – Correção dos teores de água calculados devido à umidade dos agregados e do teor de água do superplastificante;

VIII – Elaboração de outras misturas experimentais a partir dos resultados das misturas A, B, C, D e E, para ajustes na trabalhabilidade, resistência e estudo de outras condições que visem a atender aos requisitos de durabilidade.

Quanto aos fundamentos básicos do método proposto, pode-se resumir a seguir que:

- A resistência à compressão pode ser usada como referência para dosagem de um concreto de alto desempenho;

- Usando-se agregados graúdos adequados, com dimensão máxima característica entre 10 e 15 mm, concretos de alto desempenho com adequada estabilidade dimensional podem ser obtidos com teores de pasta fixos de 35 % em volume de concreto. Assim sendo, pode-se assumir um teor de pasta de 35 % para todos os traços das misturas iniciais;

- A estimativa inicial do teor de água do concreto pode ser tabelada como função da resistência à compressão, já que o teor de pasta é fixo. Quanto maior a relação água/aglomerante menor a resistência;

- A trabalhabilidade do concreto de alto desempenho, com abatimento variando entre 200 e 250 mm, pode ser controlada com o aditivo superplastificante;

- O teor em volume de argamassa úmida diminui quando são feitos concretos com menores relações água/aglomerante (mais resistentes);

- Dosando-se em laboratório um grupo de misturas com os dados calculados, variando-se o teor de substituição de cimento por pozolana, e controlando-se a trabalhabilidade com superplastificante, pode-se escolher ou ajustar o traço que melhor satisfizer as condições requeridas de resistência à compressão e abatimento.

Nota-se que o método é muito simples no que tange ao cálculo das quantidades iniciais dos materiais para as misturas experimentais iniciais. Os fundamentos básicos são claros e não é muito difícil elaborar misturas que satisfaçam as condições de resistência e trabalhabilidade. Entretanto, apesar das prescrições do método visando a durabilidade pela limitação da propagação de fissuras, tais como a dimensão máxima característica dos agregados e o volume de pasta, após encontrar-se a mistura que melhor satisfaça as condições supra-citadas, ainda é importante que se verifique a capacidade do concreto endurecido de resistir à penetração de agentes agressivos.

Outro comentário importante a se fazer é sobre a dificuldade de se encontrar um traço economicamente ideal. Escolhe-se simplesmente o melhor dentre as misturas experimentadas, pois partindo-se de vários pressupostos iniciais para elaboração das misturas, como o teor de pasta, relação entre agregado miúdo/graúdo, ou relação entre pozolana/cimento, não é possível, com o método descrito, analisar as infinitas combinações possíveis entre os diversos materiais de forma a encontrar a melhor combinação possível.

Os autores colocam uma tabela no trabalho mostrando várias proporções de misturas para concreto de alto desempenho, obtidas de várias fontes diferentes, e suas respectivas resistências à compressão aos 28 dias. A tabela 7 reproduz aquela tabela com algumas modificações, ou seja, com a introdução dos teores de argamassa e de pasta em porcentagem da massa de concreto, calculados a partir dos dados da tabela original. Isto foi feito para chamar a atenção para o fato de que, apesar das misturas terem sido produzidas por diferentes autores, com materiais diferentes, o valor do teor de argamassa parece se repetir muito mais acentuadamente que o do teor de pasta. A maioria das misturas tem teores de argamassa entre 54 e 56 %. É importante lembrar ainda que, para concretos com teores fixos de pasta em volume, a substituição de água por cimento para misturas de menor relação a/c resulta em um concreto com maior teor de pasta em massa, já que a massa específica do cimento é cerca de 3,15 vezes a da água.

Tabela 7 - Quadro comparativo de proporções para Concretos de Alto Desempenho (adaptado de MEHTA & AİTCIN, 1990)

Referência	Fc28	Cim.	CV	EAF	SA	água	areia	brita	super	a/c	argam.	pasta
	MPa	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	l/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	l/m ³		%	%
Water Tower Place	65	500	60	-	-	178	608	1068	-	0,32	56	31
Commerce Tower	65	390	100	-	-	161	575	1141	-	0,33	52	27
Internatl. First Plaza	80	360	150	-	-	148	603	1157	3	0,29	52	27
Nova Scotia Plaza	82	315	-	135	36	145	745	1130	6	0,30	55	25
Experimental Column	90	500	-	-	30	135	700	1100	15	0,25	55	27
Traço de laboratório	70	485	-	-	-	130	762	1143	3,4	0,27	55	24
Traço de laboratório	72	317	-	167	-	133	749	1145	7	0,28	54	25
Traço de laboratório	80	315	-	155	35	143	744	1142	7,5	0,29	55	26
Traço de laboratório	82	449	-	-	39	130	758	1149	11	0,27	55	25
Traço de laboratório	91	427	-	-	59	132	754	1139	14,9	0,27	55	25
Traço de laboratório	93	450	-	-	50	140	687	1108	17	0,28	55	26
Traço de laboratório	97	500	-	-	42	138	675	1130	10	0,25	55	27
Traço de laboratório	100	486	-	-	54	135	661	1112	20	0,25	55	28
Traço de laboratório	103	580	-	-	70	140	620	1025	12	0,22	58	32
Traço de laboratório	107	517	-	-	58	126	641	1126	25	0,22	54	28

2.6.4 - Método de estudo de dosagem proposto por DE LARRARD (1990)

DE LARRARD (1990) propõe um método para estudo de dosagem que tem como característica maior a procura pela maximização do poder de dispersão das partículas do cimento pelo superplastificante. Isto é feito ao encontrar-se, através de um ensaio de medida de fluidez em pastas, o ponto de saturação do superplastificante para um dado conteúdo de aglomerante de uma pasta. DE LARRARD define ponto de saturação como o máximo conteúdo de superplastificante que produz aumento de fluidez na pasta.

O método baseia-se em dois modelos. A fórmula de FERET (apud DE LARRARD, 1990) adaptada é usada para prever a resistência à compressão de concretos de alta resistência em função da resistência do cimento, da relação a/c, da relação sílica ativa/cimento e de um parâmetro dependente do tipo de agregado denominado K_g cujo valor é 4,91 quando usado para seixos rolados comuns. O modelo de FARRIS (apud DE LARRARD, 1990) para previsão da viscosidade de suspensões é a base sobre a qual o autor justifica e constrói sua proposta de dosagem afirmando que uma relação ideal entre agregados gráudo e miúdo permanecerá inalterada se a quantidade de pasta é substituída por um igual volume de uma diferente pasta tendo a mesma viscosidade. Assim sendo, para um dado conjunto de agregados, os teores de pasta e argamassa ideais permanecem inalterados qualquer que seja a resistência do concreto, desde que a viscosidade da pasta seja a mesma.

A descrição resumida passo a passo do método é feita a seguir:

I – A partir de uma composição de um concreto convencional bem proporcionado pelo método denominado Método do LCPC-Laboratoire des Ponts et Chaussees, ou outro método que tenha como princípio encontrar a curva de distribuição granulométrica ideal entre agregados, encontra-se uma outra composição com as mesmas proporções entre agregados gráudos e miúdos, mas o menor conteúdo possível de água que proporcione uma trabalhabilidade adequada medida por um ensaio dinâmico. Para isso, usa-se superplastificante em excesso e o mínimo de água e de cimento. Esta composição encontrada é denominada de concreto de controle.

Isto pode ser feito da seguinte forma: Coloca-se cimento na betoneira, um pouco de água e superplastificante em excesso, calculado sobre o conteúdo de cimento. Depois coloca-se em etapas os agregados, sempre na mesma proporção gráudo/miúdo, e em cada etapa, após a colocação dos agregados, coloca-se água até dar a consistência desejada. Quando não se conseguir mais obter a consistência desejada sabe-se que a etapa imediatamente anterior foi a do concreto com o mínimo teor de água possível;

II - Faz-se a medição do tempo de fluidez no Cone de MARSH Adaptado, de uma pasta igual à do concreto de controle, diminuindo entretanto a quantidade de água relativa entre 10 a 20 litros por metro cúbico de concreto, para minimizar o efeito da falta dos agregados graúdo e miúdo, adicionando-se superplastificante até o ponto de saturação, quando não há mais diminuição no tempo de fluidez;

III – Faz-se três outras pastas com as mesmas quantidades de água e de cimento da pasta de controle, cada uma com diferentes teores de sílica ativa, adicionada em relação à massa de cimento (5 %, 10 % e 15 %);

IV – Para cada uma das pastas, adiciona-se superplastificante aos poucos, fazendo repetidamente o ensaio com o Cone de MARSH Adaptado, até que a adição de superplastificante não tenha mais efeito (ponto de saturação). Os tempos de fluidez do ponto de saturação encontrados serão certamente maiores quanto maiores forem os teores de sílica ativa adicionados em relação ao cimento de cada pasta;

V – Para cada pasta, adiciona-se água enquanto se faz repetidamente o ensaio com o Cone de MARSH Adaptado até que a pasta apresente tempo de fluidez igual ao da pasta de controle no ponto de saturação. Logo, para cada pasta, têm-se um valor diferente para a relação a/c e teor de superplastificante;

VI – Mede-se a perda de fluidez com o tempo previsto para transporte e lançamento do concreto para verificar se há necessidade de adição de retardadores;

VII – Calcula-se os volumes de materiais do concreto para cada pasta encontrada na etapa V considerando os volumes de agregado graúdo e miúdo iguais ao do concreto de controle (no cálculo dos volumes acrescenta-se 10 a 20 litros de água para minimizar o efeito da água adsorvida pela superfície dos agregados). Com esses dados, usa-se a fórmula de FERET adaptada e calcula-se a resistência esperada para cada concreto e escolhe-se um deles para testar;

VIII – Fabricação de um concreto com as quantidades de materiais previstas que supõe-se irá atender às condições de resistência. Verificar se atende as condições de resistência e trabalhabilidade. Se a resistência for muito baixa ou muito alta retorna-se à etapa VII escolhendo outra pasta.

Os fundamentos básicos do método podem ser resumidos como a seguir:

- A resistência do concreto de alta resistência pode ser prevista pela Fórmula de FERET adaptada, a partir de um número limitado de parâmetros de dosagem (resistência do cimento, relação a/c, relação sílica ativa/cimento, e uma constante que depende do agregado);

- Dado um conjunto de agregados, há uma razão ideal entre o volume de agregado graúdo e miúdo que minimiza a quantidade de pasta;
- Dadas as condições anteriores, a trabalhabilidade é relacionada com a viscosidade da pasta;
- A razão ideal entre agregados graúdo e miúdo permanecerá inalterada se a quantidade de pasta é substituída por um igual volume de uma pasta diferente tendo a mesma viscosidade;
- O uso de conteúdos de superplastificantes ao nível do ponto de saturação leva a concretos com boas propriedades secundárias.

É muito interessante verificar o raciocínio do método. Para variar as resistências possíveis para um concreto com o teor de pasta mínimo e com o teor de superplastificante ótimo, espera-se que, para relações $a/(c+p)$ mais baixos, uma pasta de mesma reologia pode ser conseguida se o teor de substituição de cimento por pozolana for menor. O concreto de menor relação água/aglomerante possível será o com cimento puro.

DE LARRARD (1990), quando afirma que o uso de superplastificante ao nível do ponto de saturação leva a concretos com boas propriedades secundárias, provavelmente quer dizer que leva a concretos com boas características de durabilidade por utilizar de pastas maximizadas quanto a suas propriedades reológicas. No entanto, ele faz a ressalva de que esta opção pode não levar a um concreto mais barato, pois os superplastificantes são geralmente componentes de alto custo e uma mesma resistência poderia ser alcançada com um concreto com menos superplastificante e mais pasta.

Apesar de DE LARRARD (1990) afirmar que o concreto pode ficar mais caro utilizando um método que tem como base a utilização do máximo efeito do superplastificante em cada pasta, há de se observar que o mesmo tem a vantagem de evitar que se use mais superplastificante que o ponto de saturação. Não deve ser incomum que isto aconteça durante estudos de dosagem, quando os acréscimos de superplastificante só produzem efeito na trabalhabilidade pelo fato de estar-se adicionando a água contida no superplastificante, e isto pode passar despercebido.

Como comparação a outros métodos de dosagem, é interessante observar que no presente método, depois que é encontrada a mistura de concreto de controle, todas as outras misturas estudadas têm os mesmos conteúdos de agregados, ou seja, mesmos teores de pasta e argamassa.

Posteriormente, um outro artigo do mesmo autor (DE LARRARD, 1995-b) descreve um modelo para prever a resistência à compressão do concreto de alto desempenho através de uma equação derivada do modelo de FERET e aperfeiçoado mais uma vez neste outro trabalho. A

expressão coloca a resistência à compressão como função do volume de água, do volume de vazios, da massa de cimento e de um último parâmetro denominado Máxima Espessura da Pasta. Novamente pode-se observar a opção do autor por manter o volume de pasta o mais baixo possível. A Máxima Espessura da Pasta é função do tipo de agregado, da dimensão máxima característica, da qualidade da superfície do agregado, do volume de agregado e da densidade compactada. A contribuição da cinza volante é também considerada em uma expressão que define a contribuição desta pozolana mais a do cimento como teor equivalente de cimento.

O artigo mostra como os parâmetros podem ser obtidos sem grandes dificuldades e como o modelo pode servir para auxiliar em estudos de dosagem, especialmente se o tecnologista de concreto puder dispor de um software que utilize o modelo. Cita ainda a existência de um software desenvolvido para isso, denominado BETONMIX- Software for Computer – Aided Mix-Design of Concrete (1994). Por fim mostra haver boa correlação dos resultados previstos para idades de 3, 7, 28, 90, 180 e 365 dias com os resultados práticos obtidos por KIM et al. (apud DE LARRARD, 1995-b).

2.6.5 - Método de estudo de dosagem proposto por NAWY (1996)

NAWY (1996) propõe e descreve um método passo a passo para o estudo de dosagem de concretos de alta resistência baseado na utilização de algumas equações empíricas e tabelas extraídas de várias fontes diferentes que foram adaptadas no desenvolvimento do método. Como todo método construído com base na utilização de equações e tabelas, este certamente possui o mesmo defeito de sujeitar-se aos erros provenientes da utilização de materiais com características muito diferentes dos materiais com que as equações e tabelas foram construídas.

Mesmo para o concreto convencional, que possui muito menos variáveis envolvidas, a dosagem com base em tabelas universais, como o método do ACI, nunca foi totalmente aceita. Mesmo considerando a praticidade aparente de uma dosagem passo a passo utilizando-se de equações empíricas e tabelas, os desvios iniciais prováveis e a demora até encontrar o traço ideal são questões que sempre levam os tecnologistas de concreto a terem restrições a esse tipo de método. Num concreto de alto desempenho, o problema tende a ser muito maior.

No caso do método proposto por NAWY (1996), a seqüência descrita serve para a determinação de uma mistura que atenda requisitos de resistência e trabalhabilidade, mas não são observados requisitos de durabilidade (concreto de alta resistência). Sendo assim, deve ser verificado ainda se esta mistura também satisfaz os requisitos de durabilidade.

A seqüência a seguir resume os passos do método:

- I - Abatimento e resistência requerida (tabela);
- II - Tamanho máximo do agregado (tabela);
- III - Conteúdo ótimo de agregado graúdo (tabela e equação);
- IV - Estimativa da água de mistura em função do abatimento, dimensão máxima característica do agregado e do teor de vazios da areia (tabela);
- V - Seleção da relação água / aglomerante $a / (c + p)$ em massa (2 tabelas);
- VI - Cálculo do conteúdo de material aglomerante a partir da quantidade de água estimada no passo IV e da relação $a / (c + p)$;
- VII - Cálculo do conteúdo dos materiais para uma mistura básica sem pozolana;
- VIII - Cálculo do conteúdo dos materiais para 4 misturas com diferentes teores de pozolana (uso de tabela para encontrar os teores de substituição de cimento por pozolana);
- IX - Produção das misturas calculadas, verificação da trabalhabilidade e moldagem de corpos-de-prova;
- X - Ajuste da proporção das misturas para alcançar o abatimento requerido através da mudança da proporção entre os materiais, ajustando o teor de superplastificante para várias misturas;
- XI - Seleção da mistura ótima.

Em resumo, o método tem como fundamentos básicos:

- A resistência à compressão pode ser usada como referência para dosagem de um concreto de alto desempenho;
- Para concretos com resistência à compressão menor que 62 MPa, deve-se usar agregados graúdos com dimensão máxima característica de 19 ou 25 mm e para resistências maiores que 65 MPa, de 9,5 ou 12,7 mm;
- Que o teor em volume do agregado graúdo para o concreto depende somente das características do agregado graúdo, especialmente da dimensão máxima característica, que deve variar entre 0,65 para o de 9,5 mm e 0,75 para o de 25 mm. Este teor determinado é o mesmo para todos os concretos independentemente de abatimento, relação $a/(c+p)$ ou teor de pozolana;
- O teor de água depende essencialmente da dimensão máxima característica do agregado graúdo, do teor de vazios da areia e do abatimento escolhido;
- A relação água / aglomerante requerida pode ser encontrada em função da resistência à compressão e da dimensão máxima característica do agregado graúdo;
- Tendo-se o teor em volume do agregado graúdo, da água e a relação água/aglomerante, pode-se calcular facilmente o teor de aglomerante e areia;

- Dosando-se em laboratório um grupo de misturas com os dados calculados, variando-se o teor de substituição de cimento por pozolana, e controlando a trabalhabilidade com superplastificante, pode-se escolher ou ajustar o traço que melhor satisfizer as condições requeridas de resistência à compressão e abatimento.

- Quaisquer misturas diferentes do traço inicial básico que contêm somente cimento, com objetivo de variar a relação a/c ou substituir parte de cimento por pozolana podem ser feitas compensando o aumento ou diminuição do volume do aglomerante pela diminuição ou aumento de mesmo volume de areia. Ou seja, para diminuir a relação a/c aumenta-se o volume de pasta sem alteração no volume de argamassa úmida;

Uma observação importante que pode ser feita sobre o método é que ele tem como fundamento básico o fato de que o teor de argamassa depende essencialmente das características do agregado gráúdo.

Como o método depende muito de valores tabelados e as variações das 5 misturas sugeridas só objetivam variar os teores de substituição de cimento por pozolana, isto é, o método confia que a relação a/c adotada será suficiente, deve ser comum fazer as misturas e os resultados não atenderem as especificações de resistência, tendo-se que fazer mais 5 misturas e assim por diante. Além disso, ainda há que se estudar as outras exigências relacionadas à durabilidade, o que pode ser muito exaustivo.

2.6.6 - Método de estudo de dosagem proposto por ISAIA (1996-a)

ISAIA (1996-a) propõe a observação de vários requisitos para um concreto durável exposto a condições marinhas. O autor defende a elaboração de várias misturas com a adição de uma ou mais pozolanas de modo a aproveitar a possibilidade de efeitos sinérgicos entre elas e o cimento. Para isso, são elaboradas várias misturas com conteúdos definidos de substituição de cimento pelas pozolanas em massa, variando-se as relações água/aglomerante das misturas. Após a moldagem dos corpos de prova de todas as misturas, e nas idades adequadas, são feitos os ensaios de resistência à compressão, penetração acelerada de cloretos, coeficiente de absorção de água, relação iônica Cl^-/OH^- , coeficiente de carbonatação e outros ensaios que forem importantes para previsão da durabilidade do concreto no ambiente em que este será exposto. Neste trabalho o autor não descreve como o proporcionamento entre os materiais foi feito de modo a ser alcançada boa trabalhabilidade dos concretos.

Na sua tese de doutorado, ISAIA (1995) descreve com maiores detalhes os ensaios realizados e apresenta as quantidades de materiais para todas as misturas que serviram de embasamento para a proposição do método aqui referenciado. Naquele trabalho, o autor também concentra sua descrição na observação dos requisitos de durabilidade, informando que “... *para a dosagem do concreto, foram adotados os procedimentos recomendados por HELENE (1997) no sentido de compatibilizar-se os diversos parâmetros que nele influem, notadamente os ligados à interação agregados-pozolanas-aditivos, em função da trabalhabilidade pretendida*”. Diz ainda que a metodologia usada para proporcionamento das várias misturas durante o estudo seguiu, no que foi cabível, as instruções e recomendações feitas por MEHTA & AÏTCIN (1990).

O método experimental de proporcionamento do concreto convencional descrito detalhadamente por HELENE & TERZIAN (1992), conhecido por Método EPUSP/IPT, busca contrabalancear o aumento do volume da pasta à medida que se aumenta o teor de cimento nas misturas de menor relação água/cimento, através da diminuição da massa de areia na mesma proporção em que é aumentada a massa de cimento. Isto é feito fixando-se, para todos os traços, ricos ou pobres, um teor **ideal** de argamassa seca em massa.

A determinação experimental desse teor ideal de argamassa seca em massa do concreto convencional é feita através de uma mistura de proporção intermediária fixada em 1:5 (cimento:agregados totais), inicialmente com um teor de argamassa de apenas 35 %, quando, passo a passo, novos teores pré-calculados de cimento e areia são adicionados na betoneira (acréscimos de 1% do teor de argamassa), seguidos de quantidade de água suficiente para encontrar-se o abatimento requerido. Quando, após vários desses acréscimos, encontra-se uma trabalhabilidade adequada (no sentido amplo), e isto exige uma certa experiência por parte do tecnologista, o teor de argamassa dessa mistura é adotado como o teor de argamassa seca ideal. Já o teor de água dessa mistura passa a ser utilizado como referência para determinação dos teores de água dos outros traços. Nessa definição do teor ideal de argamassa, o tecnologista verifica a aparência do concreto, se parece bom o teor de argamassa, e se não há tendência à segregação ou exsudação.

Com base nas descrições feitas por ISAIA (1995, 1996-a) e por HELENE & TERZIAN (1992), é colocado a seguir um resumo das etapas de um estudo de dosagem na forma proposta por ISAIA (1996-a):

I - Definição de uma proporção inicial entre cimento puro e agregados totais (1:m) para uma primeira mistura experimental sem aditivos. HELENE & TERZIAN (1992) recomendam um traço intermediário. Poderia ser, por exemplo, um traço em massa de 1:4 (cimento:agregados

totais), sendo a relação agregado miúdo/graúdo = 0,40. Então, a proporção inicial entre cimento:areia:brita poderia ser 1:1,6:2,4 ;

II – Determinação experimental e fixação de um teor de argamassa seca ideal em massa (α) através do traço 1:4, e da relação água/materiais secos (H), esta última a ser usada somente para as misturas que tiverem a proporção 1:4 (ex.: $\alpha = 51\%$ e $H = 8\%$). A relação água/aglomerante encontrada serve para definir o valor médio das relações a/c do passo a seguir (p.ex., se encontrado $a/c=0,42$, então define-se um a/c intermediário de, por exemplo, 0,4 para o próximo passo);

II - Definição de três relações água/aglomerante em que serão feitas misturas para cada teor de substituição de cimento por pozolanas (ex.: 0,3 , 0,4 , 0,5);

III – Definição de três relações aglomerante/materiais secos através de cálculo considerando constante a relação água/materiais secos conforme a Lei de LYSE (ex.: 1:2,75 , 1:4 e 1:5,25 respectivamente às relações água/aglomerante 0,3 , 0,4 e 0,5 quando $H = 8\%$);

IV – Determinação experimental da relação água/materiais secos (H) ideal para cada uma das três relações água/aglomerante definidas anteriormente. (Percebe-se aqui que o método considera que há variação tanto no teor de pasta quanto no teor de argamassa úmida quando há variação na relação água/aglomerante – ex. : 8,5% , 8,1% , 7,7% respectivamente às relações água/aglomerante 0,3 , 0,4 e 0,5);

V - Definição de teores de substituição em massa de cimento por uma ou mais pozolanas (ex.: só cimento, 10 % SA, 10% SA + 15 % CV, etc.);

VI – Cálculo da massa de cimento, pozolanas, agregado miúdo e graúdo para cada mistura. (Só não é possível calcular o consumo de superplastificante que vai ser determinado experimentalmente em cada mistura);

VII – Elaboração de cada mistura controlando o abatimento através da adição de superplastificante o quanto for necessário até o limite recomendado pelo fabricante.

obs.: Como para cada relação água/aglomerante existe a definição da proporção entre todos os materiais secos, para encontrar o abatimento desejado, pode-se adicionar todos os materiais, toda a água e o superplastificante aos poucos até conseguir a trabalhabilidade desejada. Depois, acrescenta-se mais um pouco de todos os materiais secos na proporção calculada para corrigir a alteração na relação água/aglomerante.

VIII – Moldagem e cura de corpos de prova para os diversos ensaios planejados;

IX – Ensaios à compressão em várias idades, penetração de cloretos, coeficiente de absorção de água, relação iônica Cl^- / OH^- , coeficiente de carbonatação e outros;

X – Construção, para cada requisito de durabilidade definido por um valor de ensaio, de um diagrama de três quadrantes para correlacionar várias variáveis. Um quadrante possui curvas correlacionando resistência à compressão com relação (água+aditivo)/aglomerante, em outro há curvas correlacionando resistência à compressão com uma das variáveis escolhidas para exprimir durabilidade, e em um terceiro há curvas correlacionando relação (água+aditivo)/aglomerante com o custo equivalente de cimento por metro cúbico de concreto (ou do traço m). A figura 7 exemplifica o tipo de diagrama. O conjunto de curvas do diagrama representa várias misturas possíveis para um mesmo teor de substituição de cimento por pozolanas, dentre as inúmeras possibilidades. Para cada outro teor de substituição de cimento por pozolana que se queira experimentar, é necessário produzir pelo menos três misturas de concreto e construir novo diagrama.

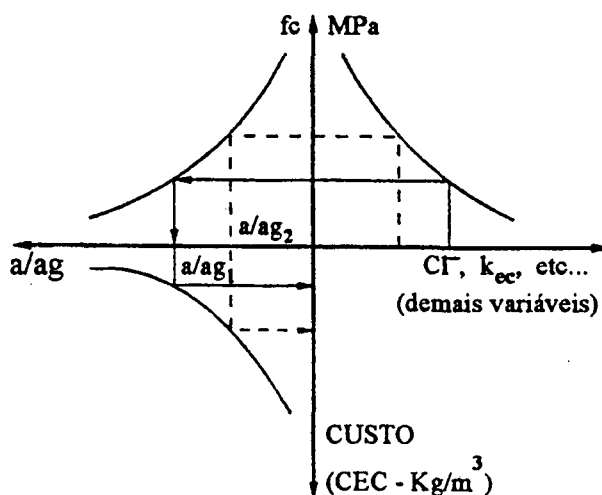


Figura 7 – Exemplo de diagrama para escolha da melhor mistura.

XI – Determinação, através dos diagramas, da mistura mais econômica que satisfaça todas as condições impostas.

Os fundamentos básicos do método podem ser resumidos como a seguir:

- Existe um teor de argamassa seca em massa ótimo que depende das características do agregado graúdo e que independe da relação água/aglomerante;
- A melhor maneira de determinar o teor ótimo de argamassa é através de tentativa experimental, iniciando-se com teores baixos de argamassa e aumentando-se aos poucos este teor até que a massa de concreto se mostre bem trabalhável;

- Para cada relação água/aglomerante, existe um teor ótimo de água e, consequentemente, um teor ótimo de pasta e argamassa úmida;

- Para cada relação água/aglomerante, em que as proporções entre os materiais são previamente definidas experimentalmente com misturas contendo somente cimento, a maior demanda de água devido à substituição de cimento por pozolanas pode ser controlada apenas com a adição de superplastificante, sem alterar as proporções entre os materiais. No entanto, é importante observar que, ao substituir cimento por pozolana em massa, aumenta-se sempre o volume de aglomerante, pois a massa específica de um cimento, da ordem de $3,15 \text{ g/cm}^3$, é sempre bem maior que a massa específica de uma pozolana, da ordem de $2,20 \text{ g/cm}^3$;

- Construindo diagramas de propriedades e de proporções, em que cada curva é obtida através de três pontos determinados experimentalmente, pode-se escolher aquela mistura que atender a todos os requisitos de projeto e for a mais econômica de todas.

Apesar do grande número de variáveis envolvidas, o método permite escolher uma proporção adequada entre os materiais de forma a atender a todos os requisitos estipulados em projeto, e isto significa um grande avanço para a tecnologia do Concreto de Alto Desempenho. Além disso, o método tem o grande mérito de permitir avaliar os custos de cada mistura de forma a escolher a mais econômica. Só não permite, e nenhum outro método chegou ainda a este ponto, estudar outras proporções mais adequadas e econômicas que porventura estejam fora das proporções estipuladas entre cimento e pozolanas.

2.6.7 – Algumas considerações sobre os métodos descritos e outros métodos de estudo de dosagem propostos recentemente

O estudo de dosagem visa encontrar um concreto que atenda a todas as especificações de projeto, devendo ser fácil, rápido, pouco dispendioso e capaz de proporcionar a mistura mais econômica possível. A estratégia adotada por cada método para o estudo de trabalhabilidade é o que mais diferencia as misturas proporcionadas por diferentes métodos para um mesmo grau de resistência à compressão e pode ter influência significativa nos custos e em outras propriedades do concreto endurecido. Em todos os métodos, depois de encontrada uma mistura com trabalhabilidade adequada, a busca por uma composição que proporcione a resistência à compressão requerida é feita pela variação na relação água/aglomerante, que por sua vez se dá pelo aumento ou diminuição do volume de aglomerante da mistura, e respectiva diminuição ou aumento dos volumes dos outros componentes. A tabela 8 mostra, para os métodos supra-

descritos, como certas variáveis se comportam frente à diminuição da relação água/aglomerante quando se procura encontrar uma mistura que proporcione maior resistência à compressão para o concreto endurecido.

Tabela 8 – Quadro resumo que mostra quais os materiais que cedem espaço para o cimento (ou aglomerante) em cada método para se conseguir misturas com maiores resistências

Método (Autor)	a / aglo.	fc	Volume Pasta	Volume Brita	Volume Areia	Volume Aglomer. + Areia	Volume Pozolana	Argamas. Seca (massa)	Troca
Addis & Alexander	↓	↑	↑	↑	↓	↓	=	↓	areia X (aglomerante + brita)
Mehta & Alticin	↓	↑	=	↑	↓	↑	=	=	brita X aglomerante
De Larrard	↓	↑ ⁽¹⁾	=	=	=	↑	↓	↑	(água + pozolana) X cimento
Nawy	↓	↑	↑	=	↓	=	=	=	areia X aglomerante
Isaia	↓	↑	↑	≈	↓	↓	=	=	areia água X X aglomerante brita

⁽¹⁾ A variação na resistência tende a ser menor que nos outros métodos porque ao diminuir a relação água/aglomerante usa-se também menores teores de pozolana

CABRERA & ATIS (1999) apresentam uma metodologia para dosagem de concretos de baixa relação água/aglomerante com altos conteúdos de cinza volante destinados à execução de pavimentos (abatimento zero). Com conteúdos de aglomerante da ordem de 400 kg/m³, os concretos apresentam resistências à compressão, à abrasão e a fadiga que, para o fim em que os autores inicialmente propõem o uso do material, podem ser classificados como Concretos de Alto Desempenho. O método tem como princípio básico encontrar, para uma composição previamente definida entre agregados graúdos, miúdos, cimento e cinza volante, o volume de água que produz a melhor compactabilidade da mistura sem adição de superplastificante, em um ensaio criado pelos autores pela adaptação do cone de ABRAMS, que é fixado à base metálica e vedado com borracha, depois sendo levado a uma mesa vibratória. Os autores demonstram que estes concretos podem se tornar trabalháveis para uso como concreto estrutural com a simples adição de superplastificante e água.

Apesar da simplicidade do método, devem ser feitas algumas considerações. Primeiro, os conteúdos de agregados aparentemente são definidos sem nenhum critério de otimização, diferente do que defende a quase totalidade dos outros pesquisadores. No trabalho de CABRERA & ATIS (1999), os autores simplesmente estipularam que todas as misturas teriam a

proporção em massa de 1:1,5:3 , entre aglomerante, areia e agregado graúdo, respectivamente. Em seguida definiram substituições em massa de cimento por cinza volante de 50 e 70 %. O método não especifica um meio de encontrar uma resistência à compressão desejada, mas simplesmente mostra que é possível encontrar resistências por volta de 40 a 60 MPa aos 28 dias de idade.

DIAZ (1998) propõe um método experimental baseado no fator de empacotamento máximo determinado através de ensaios de compactação de misturas de agregados graúdo e miúdo. A mistura que apresentar maior massa unitária após a compactação é considerada ideal. CARRAZEDO et al. (2000) apresentam um trabalho cujo objetivo era verificar a adequação dos agregados da região de Cascavel (PR-Brasil) para produção de concretos de alta resistência. Para isso, utilizaram o método de dosagem descrito por DIAZ (1998). Apesar de muitos traços informados conterem teores muito altos de aglomerante para resistências não muito elevadas, os autores apresentam algumas misturas com resultados muito bons, como uma mistura de resistência à compressão de 105,7 MPa aos 28 dias de idade, para um consumo de cimento e de sílica ativa de 505,74 e 60,69 kg/m³ de concreto, respectivamente.

CAPÍTULO III

MATERIAIS POZOLÂNICOS E SEU PAPEL NO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

3.1 – A REAÇÃO POZOLÂNICA

MEHTA (1983) cita a norma americana ASTM C 596, que define pozolana como *“um material silicoso ou sílico-aluminoso o qual possui pouco ou nenhum valor cimentício por si mesmo, mas irá, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos que possuem propriedades cimentícias”*.

Segundo o autor, está claro na definição da norma, que os minerais do cimento Portland não são as únicas fontes possíveis de formação de hidratos cimentícios. Há muitos materiais naturais e industriais capazes de fornecer componentes para formar silicatos de cálcio hidratados, sulfoaluminatos de cálcio hidratados, cálcio aluminato hidratado, ferroaluminato de cálcio hidratado e sulfoferroaluminato de cálcio hidratado, similares àqueles formados na hidratação do cimento.

De fato, antes do advento do cimento Portland, misturas de cal e cinzas vulcânicas ou argilas calcinadas eram rotineiramente empregadas como cimentos hidráulicos para fabricar argamassas e concretos. Como definido acima, tais materiais, os quais são silicosos ou aluminosos, são chamados “pozolanas”, e sua reação com a cal, normalmente lenta em temperatura ambiente, é chamada de “reação pozolânica”.

Nem todos os materiais silicosos ou aluminosos são pozolânicos. Sabe-se que minerais cristalinos, por exemplo, a sílica como quartzo, alumina como corundum, e aluminatos, como silimanita ($\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3$) e mulita ($3\text{SiO}_2\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$), possuem estruturas cristalinas de pouca energia livre e, por isso, muito estáveis, não reagindo com a solução de cal à temperatura ambiente. Somente quando esses materiais silicosos e aluminosos estão na forma não cristalina (vidro possui maior energia livre pela distorção da rede cristalina) e em pequenas partículas (com muita energia de superfície), podem hidratar a taxas lentas em soluções alcalinas para fornecer sílica e alumina para a reação com a cal, a qual permite a formação de produtos cimentícios.

É bem diferente do que acontece na hidratação dos componentes do cimento Portland, onde os seus principais componentes, silicatos de cálcio (C_3S e $\beta\text{C}_2\text{S}$) e aluminato de cálcio (C_3A), são essencialmente cristalinos, mas possuem muita energia livre, decompondo-se

rapidamente na água para fornecer os desejados íons cálcio, silicato e aluminato, que recombina-se com a água para formação dos hidratos cimentícios, liberando grande quantidade de energia na forma de calor de hidratação.

Portanto, para o propósito de avaliação de sub-produtos industriais para uso em cimento e concreto como material pozzolânico, deve ser observado que a composição mineralógica (vítrea ou cristalina) e o tamanho das partículas, mais que a composição química, deve determinar se ou não, ou quão rápido um material pode fornecer sílica e alumina para as reações com a cal.

Na hidratação do cimento Portland, os íons cálcio, necessários para a formação de hidratos cimentícios, se tornam disponíveis com a dissolução dos principais compostos presentes. Em cimentos Portland pozzolânicos, os componentes do cimento Portland se tornam a fonte dos íons cálcio, por causa da decomposição do C_3S e do βC_2S que liberam grandes quantidades de cal (hidróxido de cálcio). Normalmente, o material pozzolânico adicionado ao cimento contém pouco ou nenhum cálcio. Isto não é, entretanto, o caso de muitas cinzas industriais e escórias, algumas das quais contém analiticamente de 20 a 40 % de CaO . Se uma parte ou todo o cálcio é disponível para as reações de hidratação, o material pode ser autocimentício, como o cimento Portland. Isto depende novamente mais da mineralogia e da finura que da composição química.

Enquanto os minerais cristalinos C_3S , βC_2S e C_3A presentes no cimento Portland hidratam rapidamente a temperatura ambiente, muitas formas cristalinas contendo cálcio como a wolastonita (CS), gehlenita (C_2AS), anortita (CAS_2), akermatita (C_2MS_2), etc., não são reativas. Como os aluminossilicatos, quando presentes em forma não cristalina, esses materiais podem hidratar em soluções alcalinas, embora em taxas lentas, para fornecer cálcio e outras espécies iônicas necessárias para a formação dos produtos cimentícios. Quando isto acontece, o material não pode ser considerado simplesmente uma pozzolana no sentido clássico da palavra. É mais apropriado considerar esses materiais como “cimentícios e pozzolânicos”, porque eles contêm suficiente cálcio para serem auto cimentantes, mas necessitam de um auxílio externo para desenvolver seu potencial cimentício total.

MEHTA (1983) afirma que a “reação pozzolânica” não é limitada à interação cal-sílica, mas inclui todas as reações cimentícias no sistema $CaO - SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 - SO_3 - H_2O$. A diferença em relação às reações cimentícias na hidratação do cimento Portland é principalmente devido às taxas de reação, e não no caráter dos produtos de hidratação. Entretanto, a reação pozzolânica, como outras reações químicas, pode ser acelerada pela temperatura e por aceleradores químicos como álcalis e sulfatos.

A figura 8 mostra uma partícula de sílica ativa dissolvendo numa solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A figura 9 mostra a solubilidade de várias substâncias em função do PH da solução, dentre elas, a sílica vítrea. A solubilidade da sílica da pozolana é fator fundamental para a reação pozolânica. Importante salientar que a curva da solubilidade da sílica mostrada no diagrama refere-se à sílica amorfa e não quartzo, o qual, de acordo com KRAUSKOPF (apud LOUGHNAN, 1969), tem solubilidade de aproximadamente um décimo do valor da solubilidade da sílica amorfa.

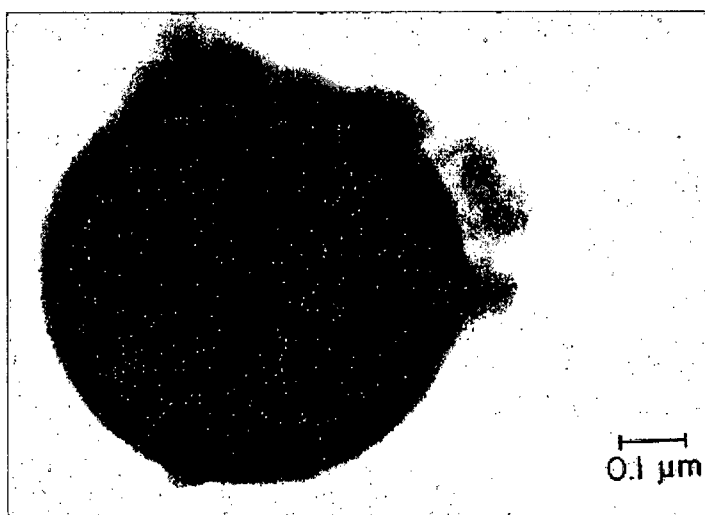


Figura 8 – Partícula de sílica ativa dissolvendo-se em solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (SARKAR, 1992)

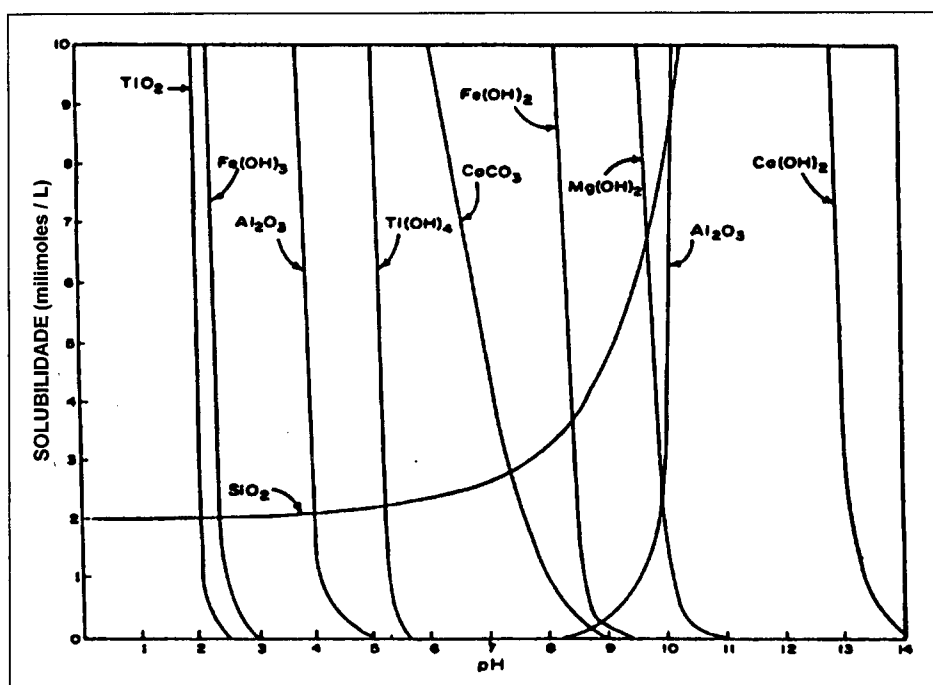


Figura 9 – Solubilidade de alguns óxidos e hidróxidos em função do PH da solução (LOUGHNAN, 1969)

3.2 – CLASSIFICAÇÃO DAS POZOLANAS

MEHTA & MONTEIRO (1994) apresentam uma tabela para classificar as pozolanas de acordo com suas características pozolânicas ou cimentantes, reproduzida abaixo na tabela 9.

Tabela 9 - Classificação, composição e caracterização das partículas de aditivos minerais para o concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994)

Classificação	Composição química e mineralógica	Características das partículas
Cimentantes e pozolânicos		
Escória granulada de alto-forno (cimentante)	Na maior parte silicatos vítreos contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e sílica. Podem estar presentes em pequena quantidade compostos cristalinos do grupo da melilita.	O material não processado tem a dimensão da areia e contém 10 a 15% de umidade. Antes de empregado deve ser seco e moído até partículas menores que 45 μm (comumente cerca de 500m ² /kg de finura Blaine). As partículas têm textura rugosa.
Cinza volante de alto-cálcio (cimentante e pozolânico) com alto teor de cálcio	Na maior parte vidro de silicato contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio, e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste geralmente de quartzo e C ₃ A; podem estar presentes cal livre e periclásio; C \heartsuit e C ₄ A ₃ \heartsuit podem estar presentes em carvões de elevado teor de enxofre. O carbono não queimado é comumente inferior a 2%.	Pó com 10 a 15 % de partículas maiores que 45 μm (comumente 300 a 400 m ² /kg de finura Blaine). Muitas partículas são esferas sólidas menores do que 20 μm de diâmetro. A superfície das partículas é geralmente lisa, mas não tão limpas quanto as cinzas volantes de baixo teor de cálcio
Pozolanas altamente reativas		
Sílica ativa	É essencialmente constituída de sílica pura na forma não cristalina	Pó extremamente fino consistindo de esferas sólidas de diâmetro médio de 0,1 μm (área específica, por adsorção de nitrogênio, de 20 m ² /g)
Cinza de casca de arroz	É essencialmente constituída de sílica pura na forma não cristalina	As partículas são geralmente menores do que 45 μm , mas são altamente celulares (área específica, por adsorção de nitrogênio, de 60 m ² /g)
Pozolanas comuns		
Cinza volante de baixo teor de cálcio	Na maior parte vidro de silicato contendo alumínio, ferro, e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste geralmente de quartzo, mulita, silimanita, hematita, e magnetita.	Pó com 15 a 30 % de partículas maiores do que 45 μm (comumente 200 a 300 m ² /kg de finura Blaine). A maior parte das partículas são esferas sólidas com 20 μm de diâmetro médio. Podem estar presentes cenosferas e plenosferas
Materiais naturais	As pozolanas naturais contêm quartzo, feldspato e mica, além de vidro de aluminossilicato	As partículas são moídas abaixo de 45 μm , na maior parte têm textura rugosa.
Pozolanas pouco reativas		
Escória de alto-forno resfriada lentamente, cinza de grelha, escória, cinza de casca de arroz queimada em campo	Consiste essencialmente de silicatos cristalinos e somente uma pequena quantidade de matéria não cristalina.	Os materiais devem ser moídos a um pó muito fino para desenvolver uma certa atividade pozolânica. As partículas moídas têm textura rugosa.

O sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ da figura 10, extraído de um trabalho de SANTAMARIA (1983) sobre materiais pozzolânicos, mostra a posição relativa da pozzolanas naturais, cinzas volantes, vidro, basaltos, escórias, clínquer Portland e de cimentos aluminosos.

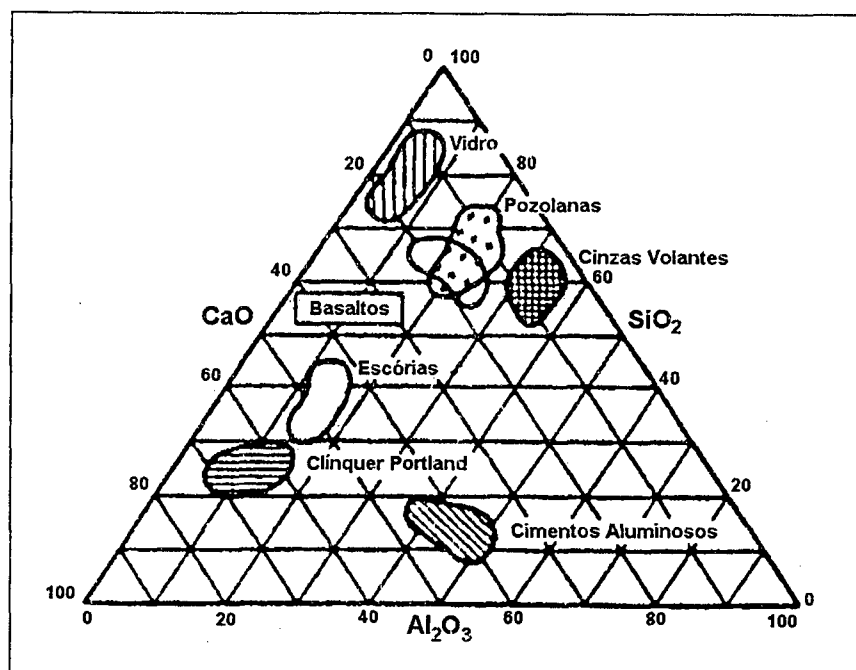


Figura 10 – Posição de vários tipos de materiais no sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (SANTAMARIA, 1983)

Dentre os materiais puramente pozzolânicos (já que a escória de alto forno é um material pozzolânico-cimentício), atualmente a cinza volante, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz são as três pozzolanas consideradas mais importantes. A cinza volante é muito importante em função da enorme quantidade de material produzido mundialmente, e a sílica ativa e a cinza de casca de arroz pelas altíssimas reatividades desses materiais, tornando-os altamente valiosos para a produção do concreto de alto desempenho.

3.3 – CINZA VOLANTE

A cinza volante é a cinza obtida por precipitação mecânica ou eletrostática dos gases de exaustão de usinas elétricas alimentadas por carvão. É a pozzolana artificial mais comum. As partículas de cinza volante são esféricas (o que é uma vantagem do ponto de vista de demanda de água) e têm uma finura muito grande: a grande maioria das partículas tem um diâmetro entre menos que $1\text{ }\mu\text{m}$ a $100\text{ }\mu\text{m}$, com mais de 50 % menores que $20\text{ }\mu\text{m}$. A área específica BLAINE

tem valores normalmente entre 250 e 600 m²/kg. A alta área específica da cinza volante torna-a prontamente disponível para reação com o hidróxido de cálcio. Segundo NEVILLE (1997), o valor típico final da massa específica é 2,35 g/cm³.

A microestrutura da cinza volante é mostrada nas figuras 11 e 12 onde pode-se observar um grande número de partículas esféricas e maciças de diâmetros, na sua maioria, na faixa entre 1 a 20 micrômetros. No entanto, pode-se observar também que nem todo o material encontra-se como partículas esféricas como revela a figura 12.

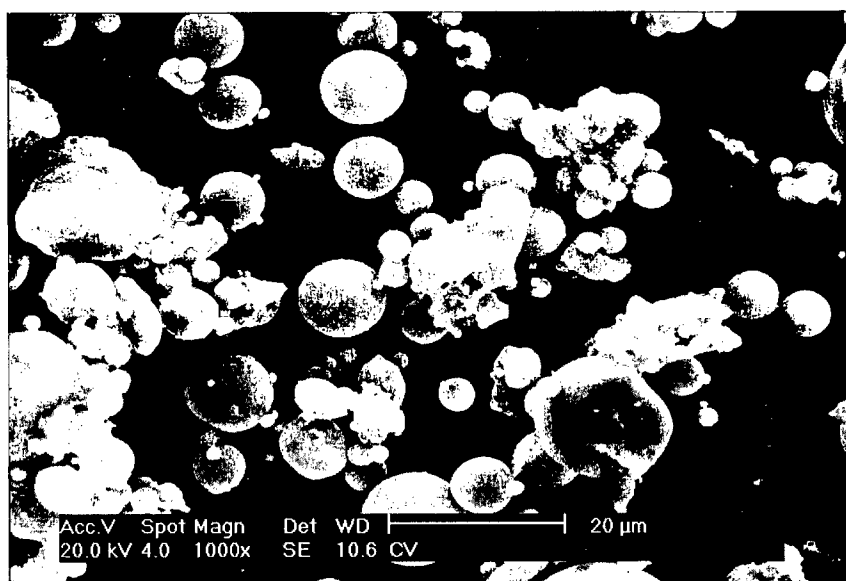


Figura 11 – Micrografia em MEV revelando a forma esférica predominante das partículas de cinza volante.

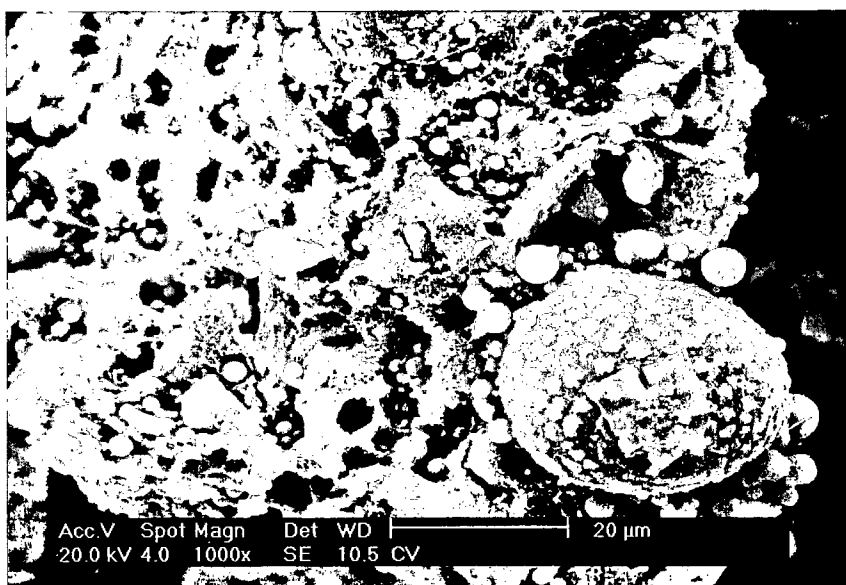


Figura 12 – Micrografia de uma cinza volante revelando muitas partículas sem forma definida.

Muitos estudos já foram realizados utilizando cinza volante para produção de concretos convencionais e de alto desempenho. Vários autores afirmam que a eficiência da cinza volante na resistência à compressão do concreto depende de muitos fatores, dentre eles o tipo cimento, da cinza volante, a idade do concreto, a faixa de resistência, parâmetros de dosagem, uso de aditivos químicos, etc. Esta procura por um fator de eficiência tem sido considerada importante, pois uma lei geral possibilitaria a escolha do teor de substituição de cimento por pozolana para um máximo de eficiência e economia. BABU & RAO (1996) fazem um reestudo com dados de vários autores e concluem que, para um limitado conjunto de condições, certas curvas representando o fator de eficiência em função da porcentagem de substituição de cimento por cinza volante, para cada idade, poderiam ser usadas como referência de dosagem.

Segundo MALHOTRA (1993), em 1989 o total de cinzas volantes produzido mundialmente foi de 400 milhões de toneladas. Comparando com o volume estimado de concreto produzido anualmente no planeta de 5,5 bilhões de toneladas (MEHTA & MONTEIRO, 1994), considerando uma massa específica de 2.200 kg/m^3 para o concreto e um consumo de 350 kg de cimento por metro cúbico de concreto, encontra-se um consumo estimado de 875 milhões de toneladas de cimento anuais. Vê-se pelos números que a produção mundial de cinza volante extrapola a capacidade de absorção de todo esse material na produção de cimento Portland, a não ser que praticamente todo o cimento produzido caia na classe dos cimentos Portland pozolânicos, e esses ainda contenham teores de cinzas próximos dos valores máximos permitidos pelas normas (a NBR 5736 permite até 50% de pozolana), o que não deixa de ser uma tendência atual.

3.4 – SÍLICA ATIVA

A sílica ativa (denominação da ABNT) é uma pozolana altamente reativa. É um subproduto da fabricação de silício ou de ligas de ferro-silício a partir de quartzo de elevada pureza e carvão, em forno elétrico de eletrodos de arco submerso. O SiO que se desprende na forma de gás, se oxida e se condensa na forma de partículas esféricas extremamente pequenas de sílica amorfa (SiO_2). Em geral, o material é recolhido por precipitação eletrostática ou filtros de manga.

Quando o forno tem um sistema eficiente de recuperação de calor, a maior parte do carvão é queimada de modo que a sílica ativa fica virtualmente isenta de carvão e tem cor clara.

Fornos sem uma recuperação completa de calor deixam parte do carvão na sílica ativa, as quais adquirem cor escura (NEVILLE, 1997).

A massa específica da sílica ativa é geralmente de $2,2 \text{ g/cm}^3$, mas pode ser um pouco maior quando possui teores de sílica menores. Este valor pode ser comparado com a massa específica do cimento Portland, que é aproximadamente $3,15 \text{ g/cm}^3$. As partículas de sílica ativa são extremamente pequenas, sendo que grande parte delas têm diâmetro entre $0,03 \text{ }\mu\text{m}$ e $0,3 \text{ }\mu\text{m}$, sendo que o diâmetro médio é tipicamente menor que $0,1 \text{ }\mu\text{m}$. A área específica dessas partículas é tão pequena que não pode ser determinada pelo método de BLAINE. Por adsorção de nitrogênio, chega-se a valores de cerca de $20 \text{ m}^2/\text{g}$, que é 13 a 20 vezes maior do que a área específica de outros materiais pozolânicos, determinada pelo mesmo método. No concreto, as pequeníssimas partículas de sílica ativa entram no espaço entre as partículas de cimento melhorando assim sua pasta, por torná-la mais compacta. A figura 13 mostra uma micrografia de um aglomerado de partículas de sílica ativa. Estes aglomerados de aparência esférica possuem ordem de grandeza de mesma magnitude das esferas de cinza volante. Devido às dimensões extremamente diminutas das partículas de sílica ativa é difícil obter micrografias que revelem sua aparência individual.

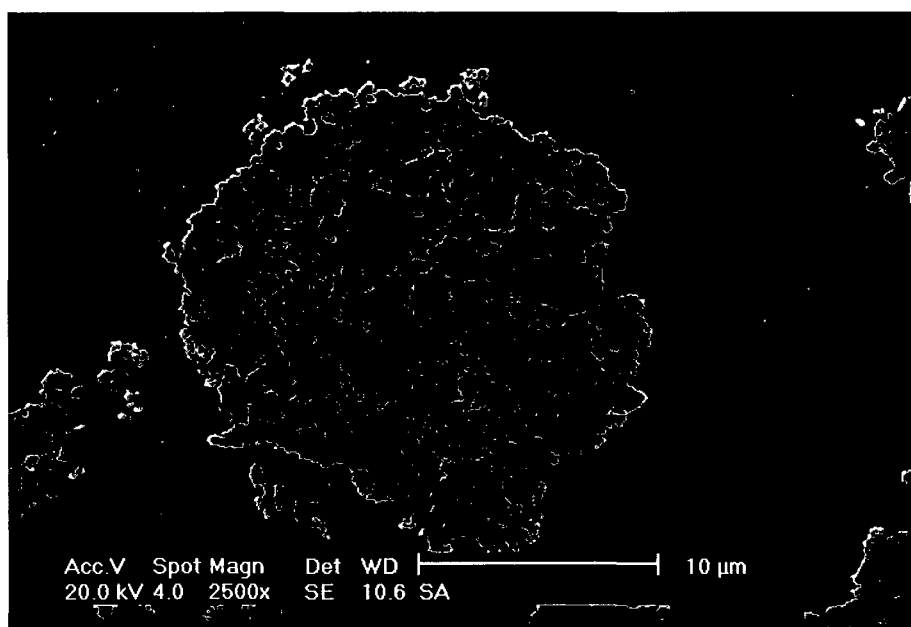


Figura 13 – Micrografia de um aglomerado de partículas de sílica ativa

Um material tão fino quanto a sílica ativa tem uma massa unitária (massa/volume aparente) muito baixa, de 200 a 300 kg/m^3 , tornando o seu manuseio “in natura” difícil e caro.

Por esse motivo, a sílica ativa é geralmente comercializada na forma de micropelotas, isto é, aglomerados de partículas, com uma massa unitária de 500 a 700 kg/m³. Outra apresentação da sílica ativa é na forma de uma suspensão (calda) com partes iguais de sílica ativa e água. A massa específica desta suspensão é de 1300 a 1400 kg/m³.

MALHOTRA (1993) estima que os Estados Unidos são um dos maiores produtores de sílica ativa do mundo, sendo que no ano de 1989 apresentaram uma produção em torno de 130.000 toneladas. A produção mundial situou-se em torno de 1.100.000 toneladas no mesmo ano. Segundo o autor, os pesquisadores têm investigado o uso deste material desde os anos 50, mas só recentemente, com o desenvolvimento dos aditivos superplastificantes e o advento da tecnologia do concreto de alto desempenho, que o material adquiriu importância.

Em função de suas qualidades, é um material de alto preço, cerca de 3 a 5 vezes o do cimento. É interessante notar que a produção mundial é relativamente pequena em relação ao potencial que o material possui para ser empregado na fabricação do concreto de alto desempenho cuja produção ainda é incipiente se comparada aos números da produção do concreto convencional.

MALHOTRA et al. (1992) fazem uma ampla revisão do papel da sílica ativa no concreto. Tratando de um grande número de aspectos que mostram as melhorias proporcionadas pelo uso deste material nas propriedades do concreto fresco e endurecido, e ainda de aspectos relacionados à durabilidade, terminam o trabalho fazendo uma lista de algumas aplicações da sílica ativa, quais sejam:

- Produzir concretos com permeabilidades muito baixas para controlar o ingresso de íons cloreto;
- Produzir concretos de alta resistência com resistências excedendo 100 MPa;
- Produzir concretos leves de alta resistência com resistências excedendo 50 MPa;
- Economizar cimento;
- Reduzir o ataque químico em plantas industriais;
- Produzir concreto projetado com reduzida perda por reflexão;
- Alcançar altas resistências em baixas idades,
- Aumentar a resistência em baixas idades de concretos contendo cinza volante ou escória;
- Controlar a reação álcali-agregado no concreto;
- Aumentar a resistência ao ataque por sulfatos.

Quanto ao módulo de deformação, num estudo realizado por DAL MOLIN & MONTEIRO (1996), os autores verificaram um acréscimo muito pequeno nesta propriedade, de cerca de 3,6 % em média, quando concretos de diferentes relações água/aglomerante tiveram substituição de 10 % de sua massa de cimento por sílica ativa.

3.5 – CINZA DE CASCA DE ARROZ

3.5.1 – A cinza da casca de arroz como material pozolânico

A utilização da cinza de casca de arroz (CCA) como material pozolânico vem sendo intensamente investigada desde a década de 70, principalmente na Índia e nos EUA, mas só partir da década de 80, com o desenvolvimento da tecnologia do concreto de alto desempenho, que a preocupação em obter um máximo de pozolanicidade do material se tornou premente. A produção de CCA com elevada pozolanicidade possibilita sua utilização no lugar da sílica ativa no concreto de alto desempenho. A norma americana ASTM C 989 classifica a cinza de casca de arroz, produzida em condições especiais, como pozolana de alta reatividade, juntamente com a sílica ativa.

MEHTA certamente foi o pesquisador que mais publicou trabalhos sobre a utilização da CCA no concreto (MEHTA, 1975, 1977, 1992, 1997; MEHTA & PITT, 1977). Em um só artigo, onde faz uma ampla revisão sobre o uso da cinza de casca de arroz no concreto (MEHTA, 1992), o autor cita, dentre outros, 12 outros trabalhos de sua autoria sobre o assunto. Ele chegou a desenvolver e patentear uma fornalha com a capacidade de controlar as condições de tempo e temperatura de queima da casca de arroz para que a sílica permaneça em estado amorfo e com elevada superfície específica, propiciando com isso a produção de uma cinza de altíssima reatividade, porém com elevado teor de carbono, o que resulta em uma cinza de cor preta e baixo valor comercial.

A casca de arroz é constituída de quatro camadas fibrosas, esponjosas ou celulares, que são altamente silicosas. Acredita-se que a sílica da casca de arroz exista na forma opalina (a opala é uma fase hidro-amorfa da sílica). Aparentemente, a sílica é transportada a partir do solo pela planta como ácido monossílico, o qual concentra-se na casca e no caule da planta por evaporação da água e, finalmente, se polimeriza para formar a membrana sílico-celulósica. HOUSTON (1972).

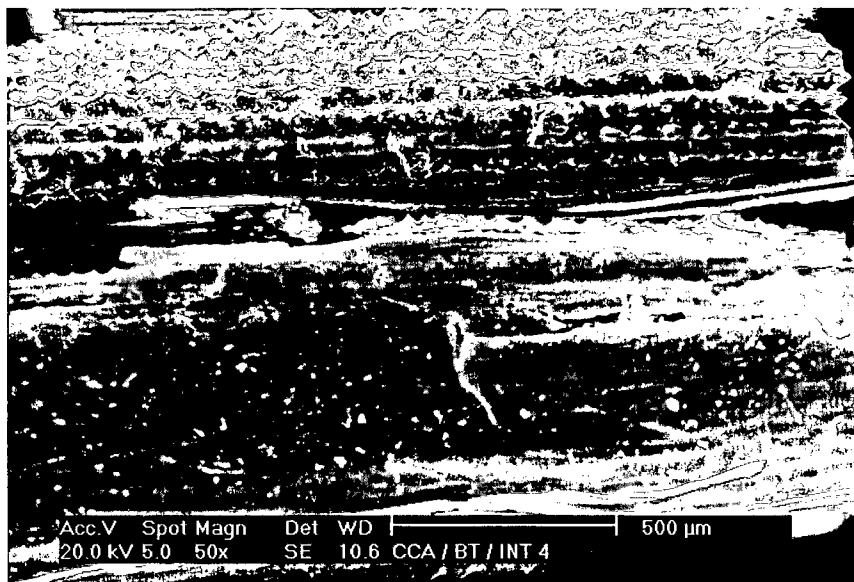


Figura 14 – Superfícies silicosas externa e interna da casca de arroz reveladas por micrografia das cinzas obtidas em combustão controlada em leito fixo

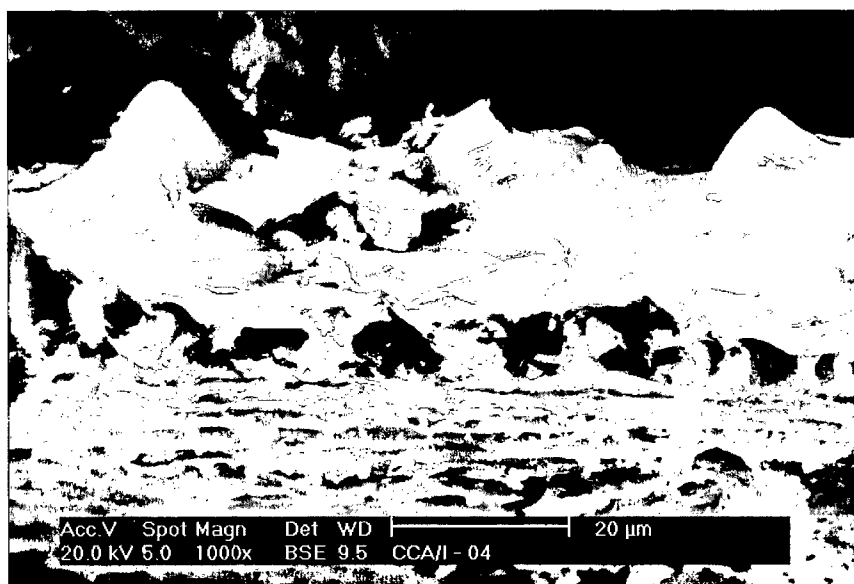


Figura 15 – Micrografia feita em MEV de cinza de casca de arroz onde se pode observar a estrutura original de sílica amorfa

Uma micrografia em MEV com baixa ampliação (figura 14) mostra como são as superfícies silicosas externa e interna da casca de arroz. A figura 15 mostra outra micrografia com maior ampliação de uma seção transversal. Entretanto, ambas as micrografias foram feitas a partir de uma amostra de cinza de casca de arroz produzida em laboratório em combustão

controlada e com extremo cuidado no manuseio para se preservar a estrutura silicosa da casca. Na parte superior da figura 14 vê-se a superfície externa e na parte inferior a superfície interna. Na parte superior da figura 15, uma epiderme corrugada e densa é claramente visível. Segue-se, logo abaixo, uma estrutura em tubos e depois o parênquima, estrutura celular com paredes muito finas.

A composição química média em base anidra da casca de arroz corresponde a aproximadamente 50 % de celulose, 30 % de lignina e 20% de sílica. A celulose e a lignina podem ser removidas por combustão controlada, deixando para trás a sílica numa forma vítrea e microporosa, de altíssima superfície específica (MEHTA & PITT, 1977).

A cinza de casca de arroz contém carbono e, por essa razão, tende a ser preta. Entretanto, a CCA pode ser também cinza, púrpura ou branca, dependendo das impurezas presentes e das condições de queima. A análise química de várias amostras de CCA, provenientes de várias regiões do mundo, mostram que o conteúdo de sílica varia de 90 a 95%. Os álcalis, K_2O e Na_2O , ocorrem como a principal impureza. O conteúdo de K_2O pode variar entre 1 e 5%, dependendo do tipo e quantidade de fertilizante utilizado na plantação. Pequenas quantidades (menos que 1%) de outras impurezas, tais como CaO , MgO e P_2O_5 , também são encontradas (HOUSTON, 1972).

HOUSTON (1972) descreve um sem número de possíveis formas de utilização na agricultura ou na indústria para a cinza de casca de arroz. A utilização como pozolana é só uma das muitas possibilidades. BEAGLE & BEAGLE (apud HOUSTON, 1972) afirmam que cinzas contendo pouco ou nenhum carbono residual possuem muitos usos potenciais adicionais. Os autores listam mais de 30 outras possíveis formas de utilização que vão desde o uso para correção do solo até o uso como abrasivo na fabricação de pasta de dente.

HOUSTON (1972) falando sobre uma das muitas possibilidades de utilização da cinza de casca de arroz de baixo teor ou livre de carbono, destaca o uso como absorvente de óleo. Afirma que, durante a queima da casca de arroz, as superfícies do ácido polissilícico, uma forma da sílica amorfa presente, se tornam parcialmente desidratadas e mais compatíveis com óleos que com água. Esta característica, combinada com a grande porosidade, permite à cinza absorver e reter grandes quantidades de óleo ou graxa, constituindo-se em um produto muito útil para postos de gasolina ou controle de acidentes com vazamento de petróleo e derivados.

Estudos experimentais realizados na Universidade da Califórnia (MEHTA, 1992), com o objetivo de obter condições ótimas de queima, para produção de cinzas com reatividade pozolânica, indicam que, quando a temperatura de queima situa-se na faixa de 500 a 700 °C, ou se o tempo de combustão é menor que 1 minuto em temperaturas entre 700 e 800 °C, a sílica

residual é mantida como fase amorfa e com porosidade interna da ordem de 50 a 100 m²/g de superfície medida através de adsorção de nitrogênio.

Como material adicionado conjuntamente ao cimento Portland, muitas propriedades únicas apresentadas pela cinza de casca de arroz têm sido reportadas por diversos pesquisadores. Com o concreto fresco, adições de misturas pozolânicas, tais como a CCA, têm a capacidade de reduzir a segregação e a exudação, e isto acarreta em grande melhoria da trabalhabilidade. Exceto a cinza de casca de arroz, nenhum outro material pozolânico, incluindo-se a sílica ativa, tem a habilidade de contribuir para o aumento na resistência mecânica do concreto em baixas idades, como 1 e 3 dias. Isto abre as portas para o uso de misturas de cinza volante e outras pozolanas normais com a CCA, com a última agindo como acelerador de resistência (MEHTA, 1992).

Apesar de ser possível substituir mais de 70 % do cimento do concreto por CCA, basta entre 10 e 20 % de substituição para que o concreto se beneficie com um aumento de resistência mecânica e uma extraordinária diminuição da permeabilidade frente aos agentes agressivos (cloretos, sulfatos, CO₂, etc.), sem que isto acarrete em nenhum efeito adverso ao material. Além disso, misturas de cimento Portland com apenas 10 % de CCA têm-se mostrado efetivas no combate à reação álcali-agregado, que é expansiva e deletéria ao concreto (MEHTA, 1992).

3.5.2 – Estado-da-arte no Brasil e no mundo da queima da casca de arroz para obtenção de pozolana para adição na produção de concreto

MEHTA (1992) publicou, através de uma patente na Bélgica em 1973, o primeiro de uma série de textos dele sobre o efeito do processo de queima na atividade pozolânica da cinza de casca de arroz. Mais tarde, PITT (1976) patenteou, nos EUA, um processo de queima controlada para obtenção de cinza de casca de arroz de alta reatividade. MEHTA & PITT (1977) publicam depois um artigo relatando o uso industrial da patente, que consiste num processo de queima da casca inteira em leito fluidizado, capaz de produzir uma cinza altamente reativa e de cor negra. Já naquela época algumas indústrias americanas, como a Riceland Foods, começaram a utilizar a casca de arroz para geração de calor baseadas no processo citado.

Posteriormente, MEHTA (1992) e vários outros pesquisadores, SALLAS (1986), SMITH (1984), ÖLMEZ & HEREN (1989), BOETENG & SKEETE (1990), SUGITA et. al. (1993), CINCOTTO & KAUPATEZ (1988), CALLEJA (1983), FARIAS & RECENA (1990), AL-KHALAF & YOUSIFT (1984), SILVEIRA & RUARO (1985), COOK (1986), JAMES & RAO (1986) (só para citar alguns das várias dezenas de trabalhos sobre o assunto), concentraram seus

esforços nas diferentes condições de queima (tempo e temperatura da zona de combustão) e suas propriedades quando adicionadas ao concreto. Com relação às condições de queima, todos os trabalhos concordam com os resultados apresentados por MEHTA, ou seja, para não haver cristalização da sílica as temperaturas deveriam situar-se entre 500 e 700 °C.

As três fases polimórficas da sílica cristalina na pressão atmosférica são quartzo α , quartzo β , tridimita e cristobalita. A forma mais estável na temperatura ambiente é o quartzo α . O quartzo α transforma-se em quartzo β à 573 °C e permanece estável até 870 °C. Entre 870 °C e 1470 °C persiste a forma tridimita e de 1470 °C até 1713 °C ela se modifica para a cristobalita. Acima de 1713 °C ocorre a fusão da sílica (ERNST, 1971).

A estrutura da sílica vítrea é metaestável e, portanto, tem a tendência de mudar lentamente para a forma cristalina, de menor energia livre, que é mais estável. Se a temperatura for mantida acima de 870 °C por um longo período, a sílica vítrea cristaliza-se em cristobalita e, eventualmente, em tridimita se as condições forem favoráveis, isto é, na presença de agentes catalisadores, principalmente íons alcalinos, processo este conhecido por devitrificação (WORRAL, 1975). No caso de sílica gel muito pura, ela não devitrifica mesmo em 5 horas a 1400 °C de acordo com GOODMAN & GREGG (apud ILER, 1979). Se são necessárias temperaturas tão altas quanto 870 °C, por longos períodos, para haja devitrificação da sílica amorfa, uma pergunta parece inevitável. Porque vários autores falam da necessidade de queima em temperaturas tão abaixo deste valor? Como já mencionado, MEHTA (1992), quando trata das temperaturas da zona de combustão em leito fluidizado, fala em temperaturas até 800 °C somente quando a queima é realizada em no máximo 1 minuto.

A presença de agentes catalisadores pode ser uma explicação, mas é importante salientar que há, em geral, uma certa confusão por parte de alguns pesquisadores da área de concreto com relação à queima da casca de arroz. Muitos trabalhos tratam fornos de sinterização como se fossem fornalhas, o que é muito diferente. Muitas das experiências de queima realizadas foram feitas com fornos de sinterização elétricos, em situações muito diferentes de uma queima industrial. Num forno de sinterização elétrico de laboratório, o calor provém das resistências elétricas e há muito pouco fluxo de ar para reação com o material combustível. Quando uma amostra de casca de arroz é colocada numa mufla por exemplo, à medida que o calor aumenta, acontece a pirólise dos componentes da casca. Estes volatizam-se mas não entram em combustão por falta de oxigênio dentro do forno e, em seguida, escapam para fora. Depois, quando restam somente cinzas e carbono, devido à baixa entrada de ar para dentro do compartimento, inicia-se o processo de formação de gás pobre (CO), que também sai da mufla para a atmosfera sem entrar em combustão.

PONTE FILHO (1988) explica como uma partícula de carvão reage com o oxigênio do ar durante a combustão em uma fornalha de queima contínua com leito fixo. Devido à intensa irradiação na zona de combustão, as partículas de carvão recebem energia radiante que produz volatilização de hidrocarbonetos que irão reagir com o oxigênio do ar quando estiverem fora da partícula. O raio da nuvem de combustão em relação ao centro da partícula vai depender, entre outros fatores, da taxa de alimentação de ar. Quando a taxa é alta, os compostos voláteis não conseguem sair da partícula tão rapidamente quanto ar novo entra no sistema e as reações ocorrem mais proximamente do núcleo da partícula. Isso ocorrendo, é claro, implica em temperaturas muito mais altas em que as partículas são sujeitas e estas, por sua vez, não podem ser adequadamente medidas nas experiências de queima com o simples uso de termopares, pois esses dispositivos somente medem uma temperatura média de uma determinada região. Houston (1972) afirma que a temperatura calculada de combustão da casca de arroz, baseada em nenhuma perda de calor, situa-se em torno de 1.870°C .

PONTE FILHO (1988) explica ainda que, só após a combustão dos voláteis, passa a haver a difusão de oxigênio do ar para dentro da partícula para reagir com o carbono fixo. À medida em que acontecem as reações com o carbono fixo, há formação de cinza na superfície da partícula e as reações se processam cada vez mais internamente, e com maior dificuldade, devido a maior dificuldade de difusão do oxigênio para dentro da partícula, pois tem que atravessar a camada de cinzas. A figura 16 mostra uma representação esquemática dos estágios do processo de reação de gaseificação e combustão no modelo de núcleo não reagido de partículas de carvão.

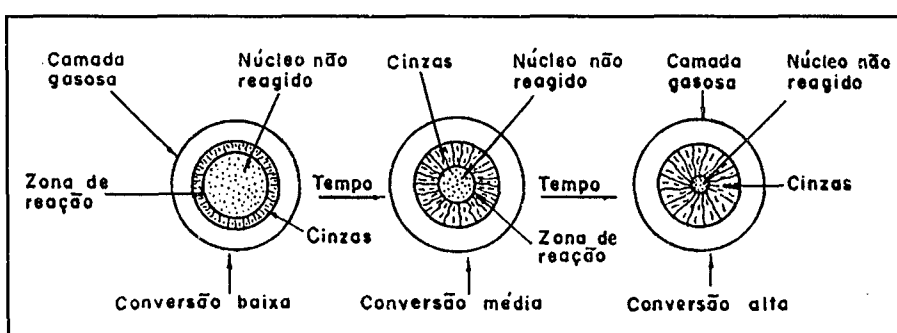


Figura 16 – Representação esquemática do processo de reação de gaseificação e combustão no modelo de núcleo não reagido de partículas de carvão.

No Brasil, existem diversas plantas em operação para geração de calor, em geral de pequeno porte e sem preocupação na obtenção de cinza reativa. O produto é considerado apenas como rejeito. SANTOS (1997) mostrou que mesmo essas cinzas, queimadas sem controle

especial, mostram boa reatividade mas, devido provavelmente à sua coloração escura, não possuem nenhum valor comercial.

Apesar de ser este um assunto antigo, as cinzas resultantes da queima da casca de arroz não têm sido muito utilizadas para produção de concreto nem no Brasil e nem nos outros países. O mercado não vê com bons olhos um concreto produzido com uma cinza de cor negra, que provoca uma coloração cinza escura no concreto, quase preta. Além disso, teores de carbono relativamente elevados tendem a provocar um aumento na demanda de água do material, pela sua elevada superfície específica, produzindo conseqüentemente um maior consumo de cimento.

Talvez por falta de visão comercial de muitos pesquisadores, esses não se preocuparam no passado em desenvolver um processo que gerasse, além de alta reatividade à cinza, também um baixo teor de carbono, para que a cinza tivesse coloração branca ou cinza clara e tivesse, conseqüentemente, um alto valor comercial. Os poucos relatos de obtenção de cinza branca pelos diversos pesquisadores não parecem ter sido intencionais. Uma exceção é a patente americana de número 4.049.464 de TUTSEK & BARTHA (1977), que descreve as condições de tempo, temperatura e ar, para gaseificação da casca e posterior combustão, com o objetivo de produzir cinza branca de alta reatividade.

Recentemente, têm sido registradas várias outras patentes internacionais para produção de sílica ativa (com ênfase na cor branca) a partir da casca de arroz. Os processos variam desde tratamentos químicos da casca a processos de queima com atmosfera super-oxidante. Nos Estados Unidos, já existem termelétricas movidas à casca de arroz, que são previamente moídas, o que proporciona melhor superfície para combustão, facilitando a queima de praticamente todo o carbono, gerando uma cinza de tom muito claro, quase branca, com menos de 6 % de carbono (perda ao fogo). Mas são processos baseados em grandes produções contínuas, para empresas de muito grande porte.

SUGITA (1992) relata um processo de queima da casca inteira que é realizado em duas fases em fornalhas rotativas. Na primeira fase, a casca é aquecida a uma temperatura entre 300 e 350 °C, e é mantida assim até a volatilização de toda água e hidrocarbonetos. Só após a eliminação de todos os voláteis, a temperatura é elevada para completar-se a combustão. Assim, segundo o autor, obtêm-se uma cinza na forma de um fino pó branco e com alta reatividade. Entretanto, é de se esperar que os custos de produção não sejam muito atrativos por necessitar do movimento de rotação das fornalhas, apesar de prever o aproveitamento da energia produzida na queima da casca.

Na mesma patente, o autor propõe outra forma de produção da cinza branca através da queima de uma pilha de casca quase que a céu aberto onde uma chaminé, no seu centro, propicia

MOLIN (1999) informam que só no Estado do Rio Grande do Sul 201,1 mil toneladas de cinza de casca de arroz produzidas anualmente permanecem sem aplicação prática.

Se toda a cinza de casca de arroz gerada no Brasil fosse produzida na cor branca (ou cinza claro) e com alta reatividade, poderia ser comercializada ao preço da sílica ativa (R\$600,00/tonelada), o que geraria um faturamento de 280,8 milhões de Reais. Na pior das hipóteses, vendida ao preço do cimento (R\$120,00/ton), valeria 56,2 milhões de Reais e não seria o transtorno ambiental que é hoje. Pode-se ainda especular que a produção da cinza a partir da palha de arroz, que equivale a 10 vezes o peso da casca produzida pela planta, e possui composição química semelhante, poderia gerar uma grande quantidade de cinzas. Há ainda que se ressaltar que a sílica ativa tem diversos outros usos potenciais em outros setores industriais, com destaque para o indústria de vidros e cerâmica.

Muitas pequenas e grandes empresas no Brasil queimam ou já queimaram grandes quantidades de casca de arroz para produção de ar quente ou vapor. Uma única grande empresa brasileira do setor de alimentos enlatados já chegou a queimar 5.000 toneladas de casca de arroz por mês. Hoje não passa de 500 toneladas porque substituiu a maior parte da casca de arroz por bagaço de cana que, apesar do custo mais alto devido ao transporte, gera muito menor quantidade de cinzas. Se essa empresa hoje dispusesse de um sistema adequado para a queima da casca de arroz que produzisse uma cinza de valor comparável à sílica ativa, as 5.000 toneladas/mês que queimava anteriormente poderiam gerar 12.000 toneladas de cinza por ano, que comercializadas a R\$600,00/ton, daria um faturamento extra de 7 milhões e 200 mil Reais por ano. Isso sem falar na eliminação do problema ambiental que hoje possui por produzir grandes quantidades de cinzas sem valor comercial.

3.5.4 - O que está faltando para dar impulso à utilização da cinza de casca de arroz no concreto.

A quantidade de informação disponível atualmente diz que é viável, técnica e economicamente, o uso da casca de arroz para produção de energia e obtenção de um resíduo de alto valor agregado. O que parece faltar é a organização dessas informações através do aperfeiçoamento do processo de gaseificação, seguido de combustão da casca de arroz, voltada para a produção de energia e de um resíduo de alto valor comercial (sílica ativa). Isso pode ser feito através da experimentação de um protótipo de fornalha em diferentes condições de funcionamento, para verificar qual condição de operação é mais eficiente na produção de cinzas com menores desvios de propriedades no resíduo.

Parece haver pelo menos três possibilidades muito interessantes de trabalhos na área. O desenvolvimento de um equipamento simples e de baixo custo, destinado às pequenas empresas e pequenas produções, é uma primeira hipótese, já que a casca de arroz é queimada em milhares de pequenas unidades beneficiadoras de arroz em todo o Brasil, seja para a secagem do arroz, seja para eliminação dos grandes volumes de casca remanescentes do processo. Uma segunda possibilidade interessante é o desenvolvimento de tecnologia de grandes produções contínuas, através do aperfeiçoamento do processo de queima em leito fluidizado com o objetivo de queimar melhor a casca. Essa tecnologia seria uma importante contribuição, mais voltada às grandes empresas, para geração de calor para suas caldeiras, possibilitando um resíduo de alto valor comercial. Uma terceira idéia é estudar a possibilidade de requeima das cinzas hoje já produzidas pelas fornalhas de leito fluidizado, utilizando da energia calorífica de um pouco de casca crua, em um processo mais simples e barato como, por exemplo, em leito fixo intermitente, de modo a reduzir o conteúdo de carbono das cinzas, viabilizando-as comercialmente.

3.6 – EFEITO FILER, MICROFILER E A SINERGIA NA ADIÇÃO DE MAIS DE UMA POZOLANA NO CONCRETO

De acordo com NEVILLE (1997), filer é um material finamente moído que, devido às suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exudação ou tendência à fissuração. Os filers são materiais considerados quimicamente inertes durante as reações de hidratação do cimento Portland, mas que podem ativar a hidratação como pontos de nucleação. Apesar de considerados quimicamente inertes, ZIELINSKA (apud NEVILLE, 1997) constatou que o CaCO_3 , que é um filer comum, reage com o C_3A e com o C_4AF produzindo $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$. A normalização brasileira permite adição de até 10 % de material carbonático (no mínimo 85 % de CaCO_3) como filer, dependendo do tipo de cimento. Isso é muito vantajoso tanto em função da melhoria das propriedades do concreto, bem como na economia que propicia à indústria de cimento, além das vantagens ecológicas pelo menor gasto de energia com a produção de clínquer.

MALHOTRA et al. (1992), tratando do papel da sílica ativa no concreto, apontam vários mecanismos físicos pelos quais este material pode melhorar as propriedades do concreto. Tratando-se de efeitos físicos, não seria impróprio extrapolar esses mecanismos para outros materiais. Entretanto, é importante ressaltar que alguns autores, quando tratam de materiais muito finos como é o caso da sílica ativa, preferem usar o termo efeito microfíler por se tratar de

escalas muito menores que, por isso, propiciam efeitos diferenciados. O autor afirma que os efeitos físicos contribuem com as propriedades do concreto por aumentar a densidade do sistema compósito pelo efeito de um melhor empacotamento das partículas, por prover um maior refinamento na estrutura de poros do concreto e, ainda, por aumentar a resistência da ligação pasta-agregado em função da redução do tamanho dos cristais de CH na região. Esta melhora nas propriedades da zona de transição acontece porque o filer provê maior número de pontos de nucleação de cristais na região, fazendo que estes fiquem menores e orientados randomicamente, e ainda possibilita a redução da espessura da zona de transição. Outra vantagem é a redução da exudação e o aumento da coesão das misturas.

Num trabalho recente, BONAVETTI et al. (1999) produziram concretos de alta resistência com cimento Portland puro como referência e mais dois concretos com adição de filer calcário, simulando o uso de cimento com filer. Os resultados, como pode ser visto na tabela 10, mostram incrementos na resistência à compressão para todas as idades. Provavelmente, como concluem os autores, as maiores resistências se devem à aceleração das reações de hidratação em função do maior número de pontos para nucleação e conseqüente precipitação dos compostos de hidratação.

Tabela 10 - Resultados do trabalho de BONAVETTI et al. (1999)

Mistura	Aglomerante (kg/m ³)	Filer (kg/m ²)	Água (kg/m ³)	fc1 (MPa)	fc7 (MPa)	fc28 (MPa)
PC	450	0	157	10,7	33,4	44,1
C10F	450	31,5	157	14	41,6	49,2
C20F	450	81,5	157	11,9	40,1	47,6

A importância do efeito microfíler é ressaltada no trabalho de GOLDMAN & BENTUR (1993) onde os autores usaram fuligem como microfíler na produção de concretos de modo a poderem separar efeitos químicos e físicos. Segundo os autores a fuligem é composta essencialmente de carbono amorfo e tem elevada superfície específica, podendo ser encontrada com partículas essencialmente na forma esférica e com diâmetro médio semelhante ao encontrado para a sílica ativa. Por não possuir nenhuma reatividade química com os compostos da pasta de cimento, o material poderia ser utilizado para comparação com a sílica ativa, para estudar efeitos físicos e químicos da adição de materiais muito finos no concreto. Foram produzidos pastas e concretos, sendo uma pasta e um concreto de referência somente com cimento, uma pasta e um concreto com cimento e sílica ativa, e ainda uma pasta e um concreto com cimento e fuligem, todos com mesma relação água/cimento igual a 0,46. A figura 18 mostra

as resistências à compressão das pastas e concretos ensaiados a várias idades. Pode-se observar, como concluem os autores, que a sílica ativa, apesar de ser um material de alto potencial para reação química, contribui muito mais pelo efeito físico que químico no incremento da resistência do concreto. Chega-se a esta conclusão pelo fato da pasta e concreto com fuligem terem alcançado resistências próximas às que chegaram com sílica ativa. Consideram então que somente as diferenças nas resistências podem ser consideradas como efeito pozolânico.

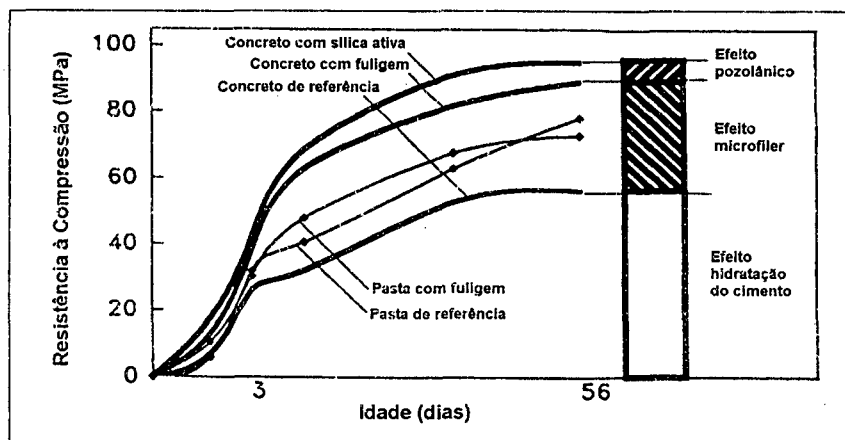


Figura 18 – Separação do efeito pozolânico e efeito filer em pastas e concretos (GOLDMAN & BENTUR, 1993)

SARKAR et al. (1990) fizeram uma experiência usando adição conjunta de escória e sílica ativa em concretos de muito alta resistência. Analisando as microestruturas das pastas por microscopia eletrônica de varredura verificaram a existência de efeito sinérgico quando duas pozolanas eram adicionadas em conjunto. Afirmam que o processo de dissolução da sílica ativa aparece muito cedo, com apenas 1 dia, e que é seguido pela formação de um gel rico a 7 dias de idade que, finalmente, se transforma em um denso gel de C-S-H em 28 dias. Já a hidratação da escória segue a uma taxa muito mais lenta, ainda mais pelo fato de que o CH necessário à sua reação é usado pela sílica ativa nas idades menores. O adiamento destas reações da escória disponibilizam mais água para reagir com o cimento, possibilitando a maximização das reações da sílica ativa e deixa a contribuição da escória para mais tarde, quando a contribuição do cimento e da sílica ativa passa a ser muito pequena. Dessa forma, os autores acreditam que os concretos possuam melhores propriedades, tanto em baixas idades quanto em idades mais avançadas, em virtude da sinergia entre as pozolanas e o cimento.

ISAIA (1995) fez um extenso trabalho de verificação da sinergia entre a cinza volante e a sílica ativa ou com cinza de casca de arroz com relação a várias propriedades relacionadas à durabilidade do concreto. Verificou que a combinação de duas pozolanas num mesmo concreto

atua sinergicamente, de maneira menos ou mais acentuada, dependendo da propriedade estudada e da combinação efetuada. Termina o trabalho propondo um método dosagem com visão holística, procurando a maximização dos recursos para produção de concretos que atendam vários requisitos de durabilidade usando o máximo do potencial dos materiais, já que há a possibilidade das pozolanas atuarem sinergicamente e por elas possuírem preços muito diferentes entre si.

CAPÍTULO IV

ESTUDO EXPERIMENTAL DE PRODUÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ DE BAIXO TEOR DE CARBONO

4.1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

No item 3.5.2, foi comentado que existe um grande número de trabalhos que versam sobre a utilização da cinza de casca de arroz para produção de concreto. No entanto, seu uso na prática ainda é incipiente, se não inexistente, pelo menos no Brasil. Não deveria ser assim, pois há grande disponibilidade do material e reconhecimento pelo meio técnico quanto à qualidade superior desta pozolana (RILEM TC 73 - SBC apud MEHTA, 1992). Não existe dificuldade em obtenção de altos volumes de cinzas de um mesmo produtor já que muito do arroz consumido é beneficiado por grandes indústrias que utilizam a casca para geração de energia em fornalhas de leito fluidizado que, como já mencionado aqui, produz cinzas com excelentes propriedades pozolânicas.

Existe o problema da necessidade de moagem das cinzas para que estas alcancem bons desempenhos, mas crê-se que o custo de moagem seja baixo frente à possibilidade de ter-se uma pozolana de tão boa qualidade. Então porque ninguém está utilizando? Porque não se conhece nenhum investimento privado no Brasil para beneficiamento das cinzas para produção de concreto? A resposta pode não ser muito simples, mas certamente uma das mais fortes razões seja o fato de que todas as cinzas produzidas pelas fábricas possuem altos teores de carbono, com valores comuns no ensaio de perda ao fogo entre 15 e 25 %, e isto significa que a adição destas cinzas no concreto, mesmo em pequenas quantidades, implica em um concreto de cor quase preta.

Em princípio, não há nenhum prejuízo ao concreto em função da cor. O concreto pode ser tão bom ou melhor que outro de cor clara. Mas o mercado não usa a lógica do cientista. O empresário, que sempre corre riscos ao fazer grandes investimentos, fica temeroso do produto sofrer discriminação e ele prejuízos. Além disso, os altos teores de carbono podem elevar o consumo de superplastificante nos concretos (DE LARRARD et al., 1992), se for tomada com base uma outra cinza com menores conteúdos de carbono.

A viabilização da utilização da cinza de casca de arroz para uso no concreto, certamente, passa pela modernização do processo de queima em leito fluidizado. Mas também passa pela reciclagem do material que hoje já é produzido pelas indústrias que queimam em leito fluidizado, ou seja, obtenção de um método para reduzir o conteúdo de carbono do resíduo hoje já existente.

Para viabilização do primeiro desafio, há a necessidade de se entender porque as cinzas produzidas em leito fluidizado possuem tão altos teores de carbono.

Um motivo é que essas fornalhas não foram desenvolvidas com o objetivo de produzir cinzas puras, mas simplesmente produzir calor. Em função disso, a velocidade do ar que produz o leito provoca o recolhimento das cinzas pelo ciclone antes que todo o carbono seja consumido. Na queima em leito fluidizado, à medida em que as partículas queimam e ficam mais leves, elas passam a flutuar em uma altura maior no leito dentro da fornalha, até que, de tão leves, saem para o ciclone e são recolhidas. Para serem recolhidas só após queimado todo o carbono, há necessidade de alterações no desenho de algumas fornalhas para que sejam possíveis velocidades menores do fluxo de ar ascendente, possibilitando, desta forma, que as partículas, ainda com muito carbono por ser consumido, não sejam recolhidas antes da hora. Mesmo naquelas fornalhas onde isso já seja hoje possível, ainda há o problema da variação da demanda de calor durante a produção. Para uma queima perfeita, é necessário que esta se processe a uma taxa constante, ou que a fornalha permita controles muito melhores dos que se consegue hoje, de modo que se possa alterar as taxas de queima e, mesmo assim, manter a qualidade da combustão.

Mas parece haver um outro problema além deste. Segundo TUTSEK & BARTHA (1977), a casca tem que sofrer um aquecimento entre 10 e 40 °C por minuto antes de entrar em combustão para que seja possível obter cinzas com baixos teores de carbono. Entretanto, sabe-se que em fornalhas de leito fluidizado as cascas são jogadas diretamente sobre o leito que possui temperatura da ordem de 800 °C. Em função disso, tende-se a imaginar que não seja possível obter cinzas brancas a partir da queima em leito fluidizado. Por outro lado, pode-se levantar a hipótese de requeimar estas cinzas por um outro processo, utilizando-se da energia de um pouco de casca crua, com o único objetivo de reduzir o conteúdo de carbono das cinzas. Essa pode ser uma alternativa para resolver o problema mesmo que não se consiga cinzas de cor branca. Poderíamos obter cinzas de cor cinza, que não haveria nenhum problema de aceitação no mercado, já que cinzas volantes possuem cor cinza e concretos produzidos com elas possuem tonalidades que são normalmente aceitas.

Para tentar responder algumas destas questões, o presente trabalho foi planejado de forma a realizar algumas tentativas de queima da casca de arroz em leito fixo, com o objetivo de produzir cinzas de casca de arroz com baixos teores de carbono (cinzas brancas) ou reduzir os teores de carbono de cinzas já existentes, obtendo-se cinzas com médios teores de carbono (material de cor cinza). A opção por uma fornalha com leito fixo intermitente deveu-se a disponibilidade de uma fornalha protótipo na universidade, que fôra construída e utilizada em diversos outros experimentos de queima de casca de arroz. Um outro objetivo complementar foi

o de verificar as propriedades pozolânicas do material produzido, verificando sua viabilidade para utilização no concreto.

4.2 - EXPERIMENTOS COM O PROTÓTIPO DE FORNALHA PARA COMBUSTÃO EM LEITO FIXO

4.2.1 – Descrição da fornalha e das hipóteses adotadas para realização das experiências

A queima da casca de arroz sempre se dá em duas etapas, mesmo quando o processo de queima é muito rápido e a distinção da existência das duas etapas não seja tão evidente. Na primeira etapa, há a volatilização de vários compostos orgânicos, que entram rapidamente em combustão na presença de oxigênio, gerando muito calor. Numa segunda etapa, acontece a queima do carbono fixo deixado na primeira etapa. Para a queima do carbono fixo, há necessidade de difusão do oxigênio do ar para dentro das partículas e, por isso, as taxas de combustão são bem menores que as primeiras. Em um determinado momento, quando já há bem menos carbono para ser consumido, a difusão começa a se tornar cada vez mais difícil e, se não houver isolamento térmico suficiente, as perdas de calor se tornam muito altas, o material se esfria e a combustão cessa. Isso pode acontecer mesmo em fornalhas de leito fluidizado, em que as partículas mais leves, por terem menos carbono, passam a flutuar numa posição muito acima do centro do leito, com temperaturas insuficientes para manter a combustão, e ainda pela pobreza em oxigênio do ar que antes passou pelo centro do leito.

Para a realização das experiências de produção de cinzas brancas a partir de casca crua e de cinza de cor cinza através da redução do teor de carbono de cinzas provenientes de leito fluidizado, foram feitas algumas modificações em uma fornalha já existente na UFSC, que foi construída para a realização de um extenso programa de pesquisa financiando pelo PADCT/MCT, e cujo relatório está disponível para consulta (PRUDÊNCIO JR. et al., 1999). As principais modificações feitas foram no sentido de mudar o modo de entrada de ar e saída dos gases queimados. A fornalha era feita em chapas de aço e isoladas termicamente do meio externo por meio de tijolos refratários. A fornalha foi construída originalmente com duas câmaras separadas por uma parede de chapa de aço, mas para as experiências descritas aqui neste trabalho, pode-se considerar como se fosse uma fornalha de câmara única. A figura 19 mostra uma fotografia da fornalha de leito fixo para queima intermitente usada para os experimentos.

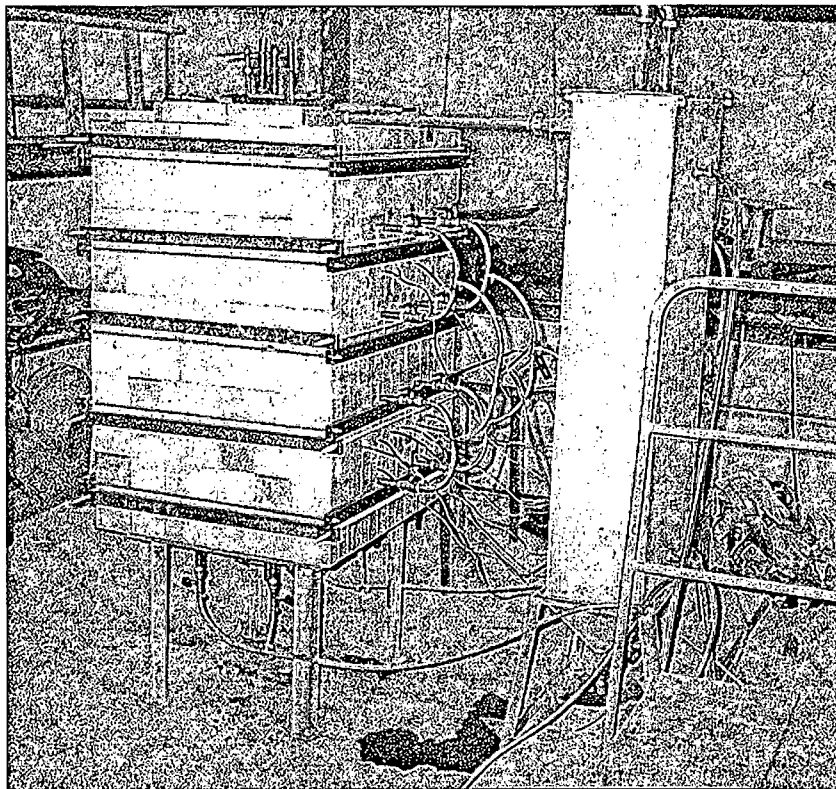


Figura 19 – Fotografia da fornalha de leito fixo usada para queima de casca de arroz

Baseado no trabalho de TUTSEK & BARTHA (1977), que afirma que o principal fator limitante para se conseguir cinzas brancas está na taxa de aquecimento da casca, e ainda inspirado no trabalho de SUGITA (1994), que construiu um aparato para queima de casca de arroz, que consiste na queima de um monte de palha a céu aberto com uma chaminé instalada no centro do monte, imaginou-se que este aparato de SUGITA (1994) conseguiria produzir cinzas brancas porque ele possibilita o aquecimento gradativo da casca antes dela entrar em combustão, como explicado por TUTSEK & BARTHA (1977).

A idéia então foi a de realizar experiências em que o fluxo de ar se desse de cima para baixo, parecido com a idéia de SUGITA (1994), mas com algumas diferenças fundamentais, entre elas a de poder ter um bom controle dos fluxos de ar e medição das temperaturas no leito. Deduziu-se que, fazendo o ar movimentar de cima para baixo, mas fazendo-se a ignição por baixo do leito, o ar rico em oxigênio só poderia participar de reações de combustão ao alcançar as regiões de altas temperaturas. Seria equivalente a um cigarro sendo soprado ao invés de aspirado. Aquecendo-se o fundo do leito de casca, inicia-se a produção e volatilização dos compostos de fácil combustão, e quentes, ao encontrar com o ar rico em oxigênio vindo de cima, queimam e geram calor suficiente para pirolizar e volatilizar mais compostos combustíveis, desta vez da região imediatamente acima da anterior, e assim por diante. Dessa forma, a camada de

combustão de gases vai queimando e caminhando para cima, deixando para trás a casca pirolizada, até chegar ao topo da massa de casca que torna-se totalmente pirolizada, isto é, sobram cinzas com muito carbono fixo, ou melhor, sobra carvão de casca de arroz. A figura 20 mostra um desenho esquematizado para explicar o que ocorre nesta primeira etapa da queima da casca que é denominada de pirólise.

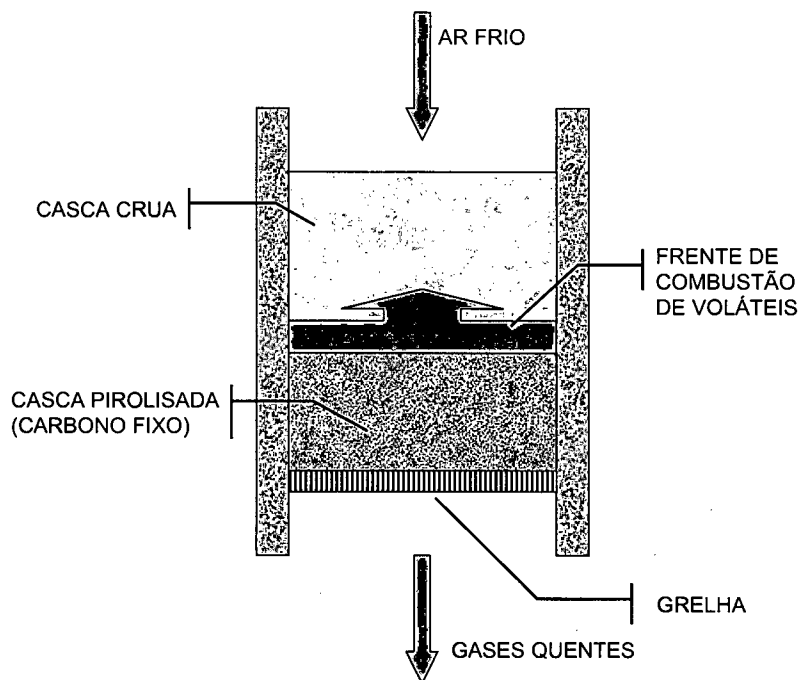


Figura 20 – Primeira etapa da queima da casca de arroz em leito fixo quando o ar é injetado de cima para baixo

Quando a camada de combustão de gases chega ao topo, os voláteis, de muito fácil combustão, já foram totalmente queimados e então o oxigênio do ar passa a ser consumido pelo carbono fixo. Assim, numa segunda etapa da queima da casca de arroz, uma nova frente de combustão aparece para fazer a combustão de carbono fixo. Esta frente caminha de cima para baixo, deixando para trás cinzas puras, sem mais carbono por ser queimado. A figura 21 mostra um desenho esquematizado descrevendo esta etapa.

Nas experiências realizadas para o presente trabalho, ao invés do ar vir totalmente por cima, ele foi distribuído uniformemente por todo o leito através de vários tubos de aço furados que atravessavam horizontalmente a fornalha. Optou-se por fazer assim essas experiências para possibilitar uma queima mais rápida que a possível pelo aparato de SUGITA (1994), e também para poder limitar as temperaturas em 700 °C. Supôs-se que isto poderia ser realizado se a distribuição de ar fosse feita por todo o volume do leito porque, dessa forma, logo após a passagem da frente de combustão de voláteis, a combustão do carbono fixo poderia ser iniciada

em todo o volume da fornalha. É importante lembrar que o processo de combustão do carbono fixo tende a ser lento se for fixado um limite de temperatura. Então, realizar a combustão do carbono fixo por todo o volume pareceu ser uma solução atraente para elevar a produtividade. Na queima realizada pelo processo a céu aberto de SUGITA (1994), a queima leva 1 dia para pirólise e mais 2 dias para combustão do carbono fixo.

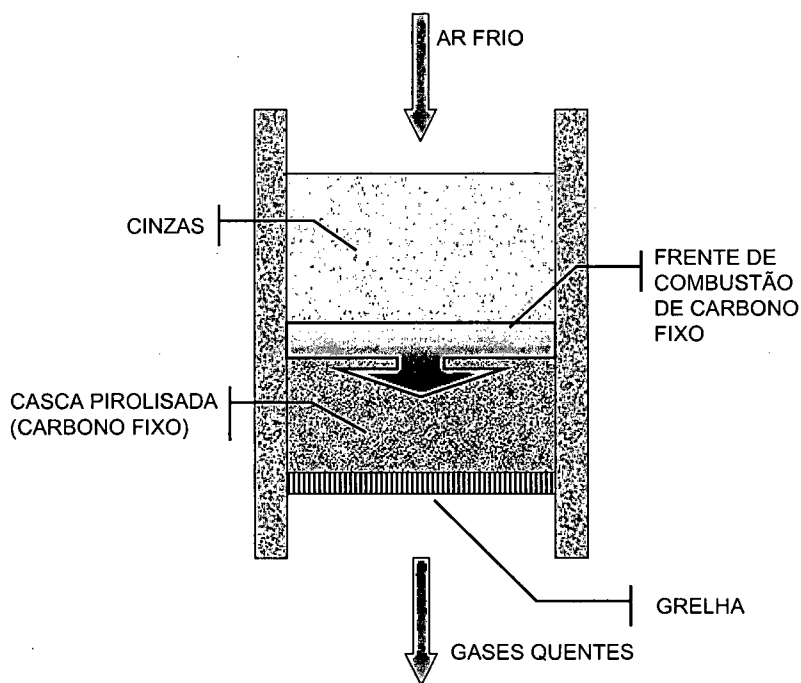


Figura 21 – Segunda etapa da queima da casca de arroz em leito fixo quando o ar é injetado de cima para baixo

A figura 22 mostra um desenho esquemático tipo corte vertical de uma câmara da fornalha, onde pode-se ver a posição dos tubos de injeção de ar I, II, III e IV de cada câmara, denominados E-I, E-II, E-III e E-IV para aqueles situados na câmara esquerda, e D-I, D-II, D-III e D-IV para aqueles da câmara direita. O desenho também mostra a posição dos termopares 1, 2, 3, 4 e 5 de cada câmara, utilizados para monitorar a elevação das temperaturas em diversos pontos da fornalha, que foram denominados e1, e2, e3, e4 e e5 para aqueles situados na câmara esquerda, e d1, d2, d3, d4 e d5 para aqueles da câmara direita.

O fluxo de ar era controlado através de válvulas de acionamento manual ligados a dois rotâmetros. Para que a temperatura nas câmaras não excedesse ao valor estipulado em cada experiência, também foram instaladas 2 válvulas automáticas de fechamento de fluxo ligadas aos termopares e2 e d2 respectivamente. A figura 23 mostra uma fotografia da mesa de controle com os rotâmetros, válvulas, seletor de termopares e termômetros digitais.

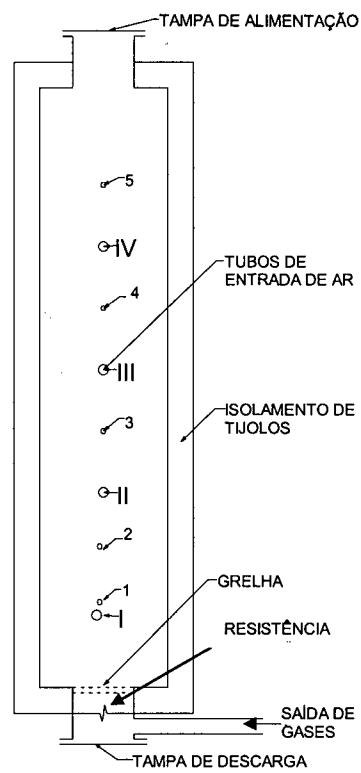


Figura 22 – Corte vertical esquemático de uma câmara de combustão da fornalha

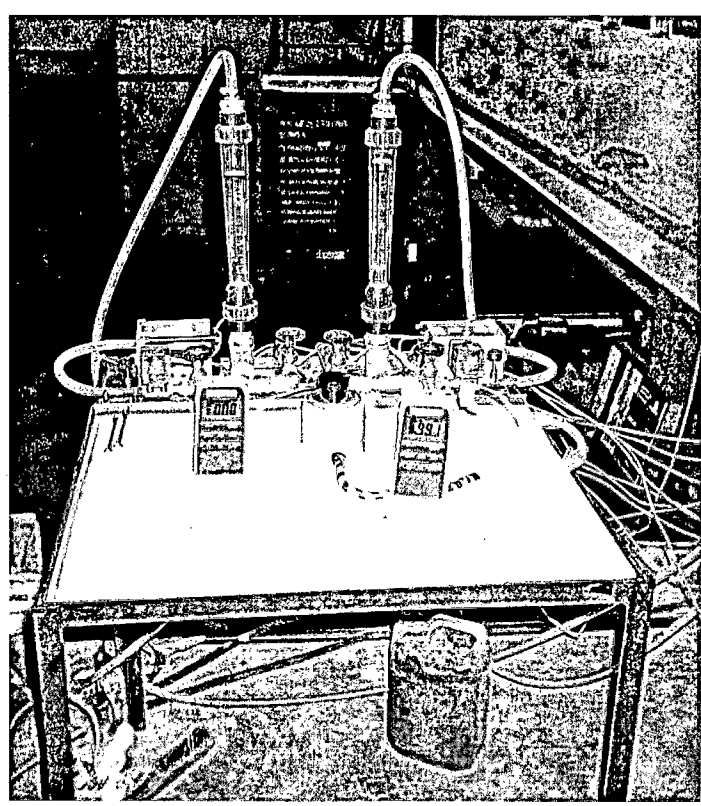


Figura 23 – Fotografia da mesa de controle de temperatura e vazão de ar

4.2.2 - Combustão da casca de arroz com fluxo de ar invertido para produção de cinza branca

Na câmara esquerda da fornalha, foram colocados 12,40 kg e na câmara direita 12,80 kg de casca de arroz. Os termopares e2 e d2 foram ligados a dois controladores de temperatura ligados a válvulas de controle de fluxo de ar para que se fechassem quando a temperatura atingisse 700 °C. A ignição foi feita pelo aquecimento da região logo abaixo da grelha, através de duas resistências elétricas que foram desligadas assim que a frente de combustão de gases se formou. As medidas de tempo e temperaturas foram registradas manualmente de 15 em 15 minutos.

A figura 24 mostra a evolução das temperaturas medidas pelos termopares d1, d2, d3, d4 e d5 durante todo o experimento. A primeira fase do experimento, que consiste na pirólise da casca, se completou por volta dos primeiros 300 minutos. Como a ignição se inicia por baixo, e a pirólise segue de baixo para cima pela queima dos gases combustíveis formados e volatilizados devido à irradiação do calor gerado pela frente de combustão desses gases, seria de se esperar que o gráfico mostrasse aumentos repentinos das temperaturas medidas pelos termopares na sequência d1, d2, d3, d4 e d5, pois estes foram posicionados nesta ordem no leito da fornalha, de baixo para cima. E isso realmente aconteceu para toda a sequência, porém para os termopares d4 e d5 os aumentos de temperatura são consideravelmente menores, pois a frente de combustão de gases não passa por eles. Isso acontece porque, apesar de posicionados dentro do leito de casca antes do início da experiência, eles estão em posições muito mais altas que os termopares d1, d2 e d3. À medida que a pirólise se realiza, o volume do leito de casca sendo pirolizada diminui, de modo que os termopares d4 e d5 passam a estar acima do leito. Isso foi confirmado pela abertura da tampa superior da fornalha durante o experimento, que mostrou que o volume aparente de casca pirolizada cai para algo em torno da metade do volume aparente inicial da casca crua.

Após verificado o pico de temperatura do termopar d5, de 192 °C aos 285 minutos do início da experiência, indicando o fim da etapa de pirólise, e confirmada tendência de queda de temperaturas em todo o leito, o fluxo de ar para combustão do carbono fixo foi aumentado de 1 para 3 m³/h, no instante 315 minutos, para que o tempo de combustão fosse o mínimo possível, mas as temperaturas máximas não ultrapassassem consideravelmente o limite estabelecido de 700 °C. Pode-se observar pelo gráfico que, com o aumento do fluxo de ar de 1 para 3 m³/h, as temperaturas nos termopares d1, d2 e d3 voltaram a subir e mantiveram-se entre 510°C e 780°C por um longo período. Após 570 minutos do início da experiência as temperaturas iniciaram um contínuo processo de declínio até que, no instante 750 minutos, com a temperatura mais alta registrada entre os termopares sendo de 276 °C, pelo termopar d1, a experiência foi finalizada.

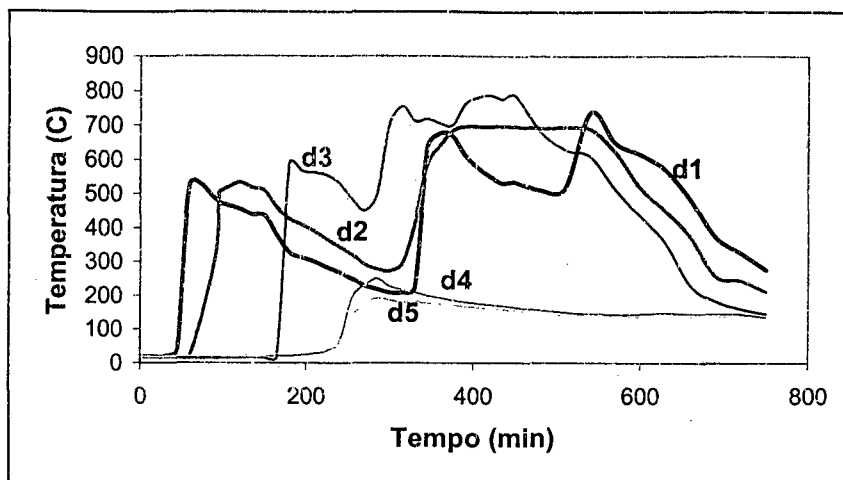


Figura 24 – Temperaturas medidas pelos termopares d1, d2, d3, d4 e d5.

Depois de resfriada a fornalha as cinzas foram retiradas e em seguida pesadas. A massa final total foi de 3,8 kg, ou seja, 15,08 % da massa inicial de casca. Observou-se que as cinzas ficaram brancas em toda a região central das câmaras, mas as cinzas que estavam muito próximas às paredes metálicas da fornalha (faixa em torno de 2 cm) ficaram pretas. Isto pode ser explicado pelo fato da fornalha ter sido construída de chapas de aço que, apesar de externamente isoladas termicamente com tijolos refratários, conduzem o calor por outros caminhos, resfriando aquelas regiões e impossibilitando que a queima se desse por completo naquela região. Mesmo assim, conseguiu-se, com um mínimo de contaminação, retirar separadamente a parte das cinzas que ficaram brancas.

Pode-se inferir da experiência que o fluxo de ar de cima para baixo na segunda fase da queima, ou seja, na etapa de combustão do carbono fixo, proporciona o não surgimento de canais preferenciais para passagem do ar, o que explicaria a manutenção de uma combustão relativamente homogênea vista pelo gráfico de temperaturas, o que não acontece se for feito de outro modo (PRUDÊNCIO JR. et al., 1999).

Foi confirmado que o tempo de queima é muito importante para que as cinzas resultem em cor branca já que, nas regiões em que elas ficaram pretas, a temperatura alcançou valores superiores a 500 °C, ou seja, temperatura suficiente para combustão. Isto significa que, além de pirólise, também houve combustão nestas regiões, mas não houve tempo suficiente para queimar todo o carbono fixo. Percebe-se ainda, que o fluxo de ar invertido em relação ao sentido de propagação da frente de combustão dos gases na primeira fase do processo (pirólise da casca) é um método simples e eficaz. O único problema realmente verificado foi o do revestimento interno da fornalha com chapas de aço. Entretanto, por falta de tempo e recursos para construção de outra fornalha, optou-se por terminar os experimentos, conscientes desta limitação.

Com o objetivo de se medir a taxa de aumento de temperatura da casca durante a pirólise, em função da aproximação da frente de combustão de gases, foi realizada uma nova experiência em condições semelhantes a anterior. Para isso, as medidas de temperatura com alguns termopares foram realizadas em intervalos de tempo bem menores, de 1 em 1 minuto. Assim, poder-se-ia determinar quais as taxas de aumento de temperatura seriam registradas naqueles pontos onde se localizavam esses termopares. Os resultados poderiam então ser comparados com os valores limites observados por TUTSEK & BARTHA (1977).

A tabela 11 mostra a evolução da temperatura medida no termopar d2, de 1 em 1 minuto, a partir do momento que percebeu-se, pelo aumento da temperatura no termopar, a aproximação da frente de combustão de gases. O fluxo de ar nesse período era de 1 m³/h.

Tabela 11 – Evolução da temperatura medida no termopar d2 com aproximação da frente de combustão

t (min.)	T (°C)	t (min.)	T (°C)	t (min.)	T (°C)	t (min.)	T (°C)	t (min.)	T (°C)
0	130	11	434	22	465	33	471	44	476
1	173	12	444	23	465	34	472	45	475
2	203	13	450	24	466	35	472	46	473
3	239	14	454	25	467	36	473	47	472
4	265	15	457	26	467	37	474	48	470
5	297	16	460	27	468	38	475	49	469
6	327	17	462	28	469	39	476	50	468
7	357	18	463	29	469	40	477	51	466
8	383	19	464	30	470	41	478	52	465
9	404	20	464	31	471	42	478	53	464
10	421	21	465	32	471	43	478	54	463

A tabela 12 mostra a evolução da temperatura no termopar d3, que começa a ser medida assim que é notada que a frente de combustão de gases se aproxima (tempo = 0 minutos). O fluxo de ar nesse período era de 3 m³/h. Observa-se que, entre os 5 e 10 minutos, a taxa de aquecimento é bem superior à que aconteceu no termopar d2, e isto se deve a maior taxa de injeção de ar, de 3 m³/h, quando da aproximação da frente de combustão de gases do termopar d2.

Verifica-se que a taxa de injeção de ar altera a velocidade de aquecimento quando da aproximação da frente de combustão, o que era esperado e, no caso de 3 m³/h, a taxa chega a mais de 80 °C/min, o que deveria ser ruim para gerar cinzas de baixo teor de carbono, já que a bibliografia fala em valores ideais entre 10 e 40 °C/min. No entanto, as cinzas resultantes foram brancas. Uma explicação para isso é que as taxas de aquecimento medidas no presente trabalho

são valores reais, produzidos pelas próprias reações de combustão, pois não havia outra fonte externa de calor.

Tabela 12 – Evolução da temperatura medida no termopar d3 com aproximação da frente de combustão

t (min.)	T (°C)	t (min.)	T (°C)	t (min.)	T (°C)	t (min.)	T (°C)	t (min.)	T (°C)
0	27	4	115	8	468	12	616	16	584
1	41	5	180	9	539	13	610	17	579
2	58	6	270	10	586	14	602	18	575
3	74	7	371	11	611	15	590		

Já no trabalho de TUTSEK & BARTHA (1977), as taxas de aquecimento citadas eram valores do controlador de um forno elétrico (não era uma fornalha) e, sendo assim, é um valor médio medido por um só termopar. Por exemplo, quando colocamos um forno elétrico para aquecer a uma taxa de 40 °C por minuto, a resistência elétrica aquece a uma taxa muitas vezes maior (quase que instantaneamente vai a temperaturas acima de 1000 °C), que passa a fornecer calor a todo o volume do forno, e só é desligada quando o termopar ligado ao controlador aquece até a temperatura estipulada para aquele tempo determinado. Logo, quando TUTSEK & BARTHA (1977) dizem que o limite superior da taxa de aquecimento é de 40 °C/min, eles na verdade informam a taxa média de um forno elétrico que, entretanto, possui regiões em que as temperaturas subiram muito mais rapidamente que isso.

Finalmente, foi realizada uma outra experiência, quando a temperatura de queima foi limitada a 500 °C através de um menor fluxo de ar, com o objetivo de verificar se era possível conseguir cinzas brancas com um limite menor de temperatura. Da mesma forma que nas experiências anteriores, as cinzas apresentaram-se de cor branca com um pouco de cinzas pretas nas regiões em contato com as chapas de aço de revestimento interno da fornalha. Entretanto, o tempo necessário para o ciclo total foi muito grande, cerca do dobro do da primeira, que mostra não ser vantajoso, pelo menos em princípio, que o limite de temperatura seja tão baixo.

4.2.3 - Combustão de mistura de casca de arroz com cinza de casca de arroz proveniente de queima em leito fluidizado

Esta experiência teve o objetivo de verificar a possibilidade de requeimar uma cinza de casca de arroz proveniente de leito fluidizado, com alto conteúdo de material carbonoso,

naturalmente compactada e com os grãos quebrados devido à armazenagem em silo e transporte, quando misturada com parte de casca de arroz crua como fonte de calor e para formar uma estrutura de casca pirolizada que permitisse a distribuição e fluxo de ar. Programou-se fazer a requeima em leito fixo intermitente com fluxo de ar invertido em relação ao sentido de propagação da frente de combustão, da mesma forma que nas outras experiências, e limitando-se a temperatura do controlador a 700 °C.

A mistura foi de 2 kg de casca de arroz com 20 kg de cinzas, e ainda colocou-se mais 1 kg de casca no fundo da fornalha. A experiência foi realizada só do lado direito da fornalha. A câmara esquerda foi enchida com cinzas somente para proporcionar isolamento térmico, mas nesta não foi injetado ar. O termopar d2 foi ligado a um controlador de temperatura ligado à válvula de controle de fluxo de ar para que se fechasse quando a temperatura atingisse 700 °C. A figura 25 mostra a evolução das temperaturas nos termopares d1, d2, d3, d4 e d5 durante todo o experimento.

Como na experiência anterior, as temperaturas medidas pelos termopares sobem na sequência d1, d2, d3, d4 e d5, indicando a passagem da frente de combustão dos gases gerados na pirólise da casca misturada às cinzas. Como nesta experiência o conteúdo de casca crua é pequeno, a diminuição no volume aparente do material é também pequeno, e só o termopar d5 fica acima do leito devido ao encolhimento que acontece durante a pirólise. Por causa disso só o termopar d5 permanece sem registrar aumentos consideráveis na temperatura local.

Pelo pico de temperatura de 75 °C, registrado aos 255 minutos pelo termopar d5, percebe-se o final da etapa de pirólise. A partir deste instante o fluxo de ar foi aumentado de 1 para 2 m³/h e assim permaneceu até o fim da experiência. Verifica-se que as temperaturas registradas pelos termopares d1, d2, d3 e d4 adquiriram relativa homogeneidade. Como o registro de tempo e temperaturas era feito manualmente de 15 em 15 minutos, e após 525 minutos do início da experiência as temperaturas registradas não demonstravam fim iminente das reações de combustão, a experiência continuou sem o registro de temperaturas, mas com a continuação do fluxo de ar para combustão à taxa de 2 m³/h. Após 1050 minutos do início da experiência, e verificado que as temperaturas dentro da fornalha se situavam em torno de 50 °C em todos os termopares, a experiência foi finalizada.

As cinzas após a requeima apresentaram-se bem mais claras do que antes de serem colocadas para requeima. As cinzas antes tinham a cor muito preta e depois ficaram de cor cinza, um tom muito próximo do cimento pozolânico comercializado em Florianópolis. Isso demonstra a viabilidade do método para diminuir o teor de carbono e a tonalidade escura que este dá ao concreto.

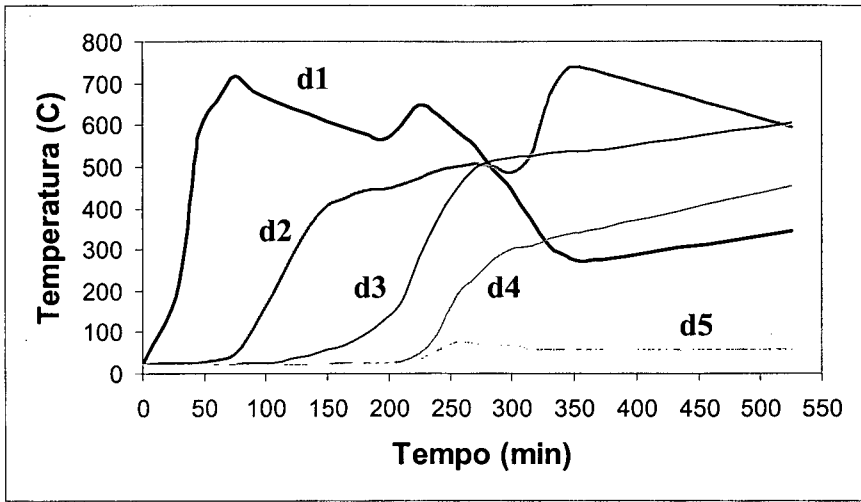


Figura 25 – Temperaturas em função do tempo nos termopares d1, d2, d3, d4 e d5.

A figura 26 mostra uma fotografia das três cinzas obtidas do conjunto de experimentos. Mais à esquerda, tem-se a cinza branca obtida da queima de casca crua dos experimentos relatados no item 4.2.2. No centro têm-se a cinza de cor cinza obtida pela requeima de cinza preta proveniente de queima em leito fluidizado. Por fim, à direita está uma parte da mesma amostra da cinza preta proveniente de queima industrial em leito fluidizado que, após a experiência de requeima, resultou na cinza de cor cinza mostrada ao centro.

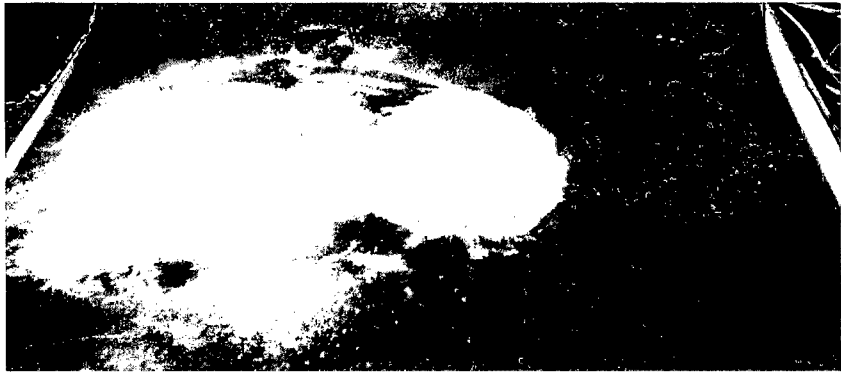


Figura 26 – Da esquerda para a direita a cinza branca, cinza de tom cinza e cinza preta

Durante o experimento, fez-se a abertura da tampa superior da fornalha e o fechamento da saída inferior dos gases de combustão, invertendo-se o sentido do fluxo de saída dos gases para verificar sua influência na mudança das temperaturas no volume da fornalha e no tempo total de queima. Isto realmente provocou alteração nas temperaturas da fornalha (picos no gráfico), mas não mudou o tempo total da combustão do material.

A mistura de cascas e cinzas utilizada tinha densidade aparente de aproximadamente 250 kg/m³. Como na requeima perdeu-se em torno de 11 % da massa, vê-se que o método é promissor, já que pode-se ter uma produtividade economicamente interessante, por volta de 200 a 250 kg de cinzas de cor cinza a partir de cinzas pretas provenientes de leito fluidizado, por metro cúbico de fornalha, a cada dia de trabalho.

Verificou-se ainda, se o processo de requeima implicaria na cristalização das cinzas, o que pode ser analisado comparando os difratogramas da cinza preta, proveniente de leito fluidizado, com a cinza de tom cinza, ou seja, a mesma cinza após a experiência de requeima. O difratômetro foi programado para executar cada varredura de $5^\circ < 2\theta < 65^\circ$ durante o tempo de 60 minutos. Verifica-se que o difratograma da cinza preta, proveniente de leito fluidizado e denominada CCA-AT (cinza de casca de arroz com alto teor de carbono), mostrado na figura 27, é típico de um material vítreo, pois não mostra nenhum pico de difração proeminente que pudesse significar a existência de significativa coordenação atômica, com distância característica entre determinados planos cristalinos.

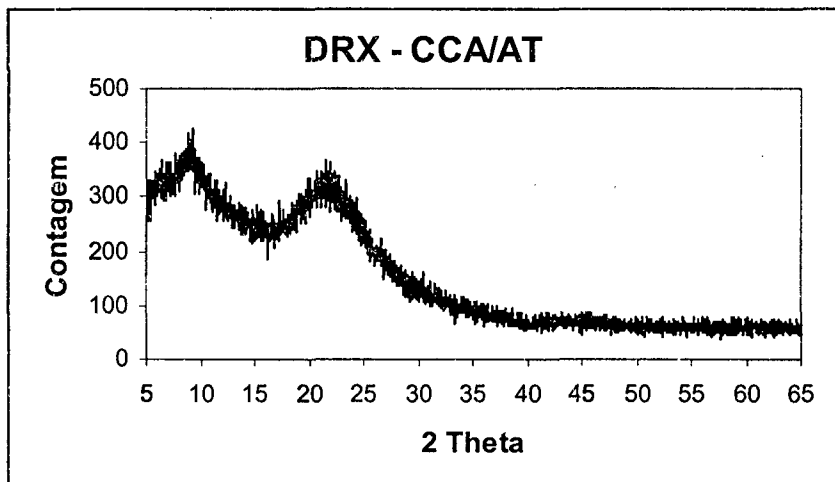


Figura 27 – Difratograma de Raios-X da cinza de casca de arroz de alto teor de carbono

Observando-se a figura 28, contendo o difratograma da amostra requeimada, denominada CCA-MT (cinza de casca de arroz de médio teor de carbono), pode-se ver que não houve nenhuma alteração considerável no difratograma, demonstrando que a cinza permaneceu essencialmente vítrea, propriedade esta importante para possibilitar as reações pozolânicas.

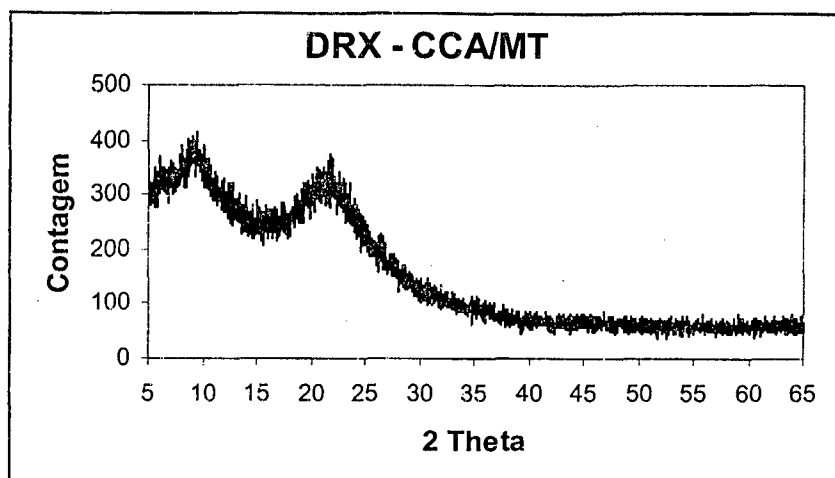


Figura 28 – Difratoograma de Raios-X da cinza de casca de arroz de médio teor de carbono

Por fim foi obtido ainda um difratograma da amostra de cinza branca, da experiência anterior, denominada CCA/BT (cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono), para comparação com os dois difratogramas anteriores. Pode-se observar pela figura 29, que o material também é essencialmente vítreo, mas parece já mostrar a tendência de formação dos primeiros picos cristalinos. Também mostra que contagem de energia do feixe de raios-X difratado para algumas faixas de ângulos é um pouco maior, o que demonstraria desordem atômica um pouco menor que das duas cinzas anteriores, já que todos os parâmetros para a análise foram iguais, como o tempo de varredura, a faixa de ângulos de varredura e a energia do feixe de raios-X incidente.

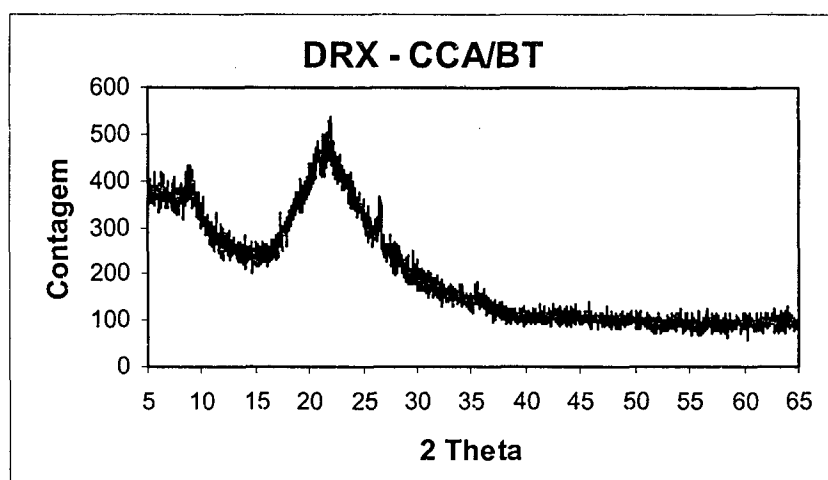


Figura 29 – Difratoograma de Raios-X da cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono

CAPÍTULO V

DOSAGEM DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO E COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES POZOLÂNICAS DAS CINZAS

5.1- INTRODUÇÃO

No Capítulo IV foram relatadas as experiências para produção de cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono a partir da queima de casca crua, e de requeima de cinza de casca de arroz proveniente de queima em leito fluidizado para diminuição do conteúdo de carbono das cinzas. Percebeu-se que, visualmente, as cinzas atenderam aos objetivos propostos, pois conseguiu-se produzir cinzas de cor branca, e fazer com que as cinzas pretas de leito fluidizado ficassem com tom cinza, mantendo a sílica no estado amorfo. No entanto, também se fazia necessário avaliar se essas cinzas produziram bom desempenho quando adicionadas às misturas para fabricação de concreto.

Neste capítulo, apresenta-se a comparação feita entre as três cinzas de casca de arroz obtidas nos experimentos do capítulo anterior, avaliando-as quanto às suas propriedades e comparando-as com outras pozolanas. Foram feitos vários ensaios de caracterização de materiais, dosadas várias misturas para concreto de alto desempenho, determinadas as resistências à compressão nas idades de 1, 3, 28 e 63 dias, além de ensaio de penetração acelerada de cloretos a 90 dias de idade.

A elaboração das misturas de concreto de alto desempenho teve dois propósitos. Um foi o de permitir a comparação das cinzas de casca de arroz obtidas nos experimentos de queima com duas amostras de pozolanas comerciais (uma sílica ativa e uma cinza volante). Outro objetivo foi possibilitar um estudo de correlação múltipla entre a resistência à compressão do concreto, ou da resistência à penetração acelerada de cloretos, com as quantidades de cada material contido nas misturas de concreto.

Este segundo objetivo visou o desenvolvimento de um método de estudo de dosagem que permitisse prever a mistura mais econômica possível, a partir de um conjunto limitado de traços elaborados em laboratório. A descrição e resultados de todas as misturas efetuadas é feita no presente capítulo, mas os estudos de correlação na regressão múltipla visando o método de dosagem e a proposição do método é apresentado no capítulo VI.

5.2 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARA OS CONCRETOS

Cimento – Foi usado Cimento Portland Comum CP-I-S 32. Sua composição física e química é dada na tabela 13.

Água – Água tratada de sistema local de abastecimento foi usada para a produção de concretos e pastas.

Agregados – O agregado graúdo foi granito britado com dimensão máxima característica de 19 mm e o agregado miúdo foi areia quartzosa natural. Suas características físicas são mostradas na tabela 14.

Sílica Ativa – Foi utilizada Sílica Ativa na forma de pó. Suas características físicas e químicas são descritas nas tabelas 15 e 16.

Cinza de Casca de Arroz – Foram usadas três amostras de cinzas de casca de arroz moídas em moinho de bolas por um período de 2 horas. A maioria dos traços foi dosado utilizando-se a Cinza de Casca de Arroz de Baixo Teor de Carbono obtida dos experimentos de queima de casca de arroz em leito fixo descritos no capítulo anterior que recebeu a denominação de Cinza de Casca de Arroz de Baixo Teor de Carbono (CCA/BT). As duas outras amostras de cinzas foram utilizadas em uns poucos traços para estudo da influência do teor de carbono nas propriedades do concreto e foram obtidas de uma indústria de beneficiamento de arroz que queima casca em fornalha de leito fluidizado. Uma mesma amostra de cinzas foi dividida em duas metades, sendo que uma delas foi levada a requeima conforme já descrito no capítulo anterior e, em seguida, foi moída. Já a outra metade foi simplesmente moída. A primeira recebeu denominação de Cinza de Casca de Arroz de Médio Teor de Carbono (CCA/MT) e a segunda de Cinza de Casca de Arroz de Alto Teor de Carbono (CCA/AT). As características físicas e químicas das três amostras de CCA são apresentadas nas tabelas 15 e 16.

Cinza Volante – Suas características físicas e químicas são apresentadas nas tabelas 15 e 16.

Aditivos químicos – Foram utilizados um plastificante à base de lignosulfonato de densidade $1,16 \text{ g/cm}^3$ e um superplastificante à base de melamina sulfonato com densidade $1,21 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 13 – Caracterização física e química do cimento

Análise Física		Análise Química (Fluorescência de Raios-X)		Resistência à Compressão (NBR 7215, 1991)	
Ensaio	Resultado	Ensaio	Resultado	(dias)	(MPa)
Passante # 0.075mm (NBR 11579, 1991)	98,58	Perda ao Fogo (NBR 5743, 1989)	3,30	1	14,1
Passante # 0.045 mm (NBR 9202, 1985)	91,52	SiO ₂	18,47	3	28,7
Massa Específica (Mg/m ³) (NBR 6474, 1984)	3,08	Al ₂ O ₃	4,43	7	34,4
Blaine (m ² /kg) (NBR 7224, 1984)	316	Fe ₂ O ₃	2,76	28	42,9
Início de Pega (min) (NBR 11581, 1991)	182	CaO	60,96		
Fim de Pega (min) (NBR 11581, 1981)	247	MgO	4,78		
		SO ₃	2,86		
		K ₂ O + Na ₂ O	0,61		

Tabela 14 – Características físicas dos agregados (NBR 7217, 1987)

Dimensão da Malha (mm)	Agregado Graúdo		Agregado Miúdo	
	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada
19.5	0	0	0	0
12.5	50	-	0	-
9.5	29	79	0	0
4.8	18	97	0	0
2.4	2	99	8	8
1.2	0	99	32	40
0.6	0	99	20	60
0.3	0	99	19	79
0.15	0	99	16	95
<0.15	2	-	6	-
Diâmetro Máximo Nominal	19 mm		4.8 mm	
Módulo de Finura	6,71		2,82	
Massa Específica (Mg/m ³)	2,65		2,60	

Tabela 15 - Características físicas e químicas do cimento e pozolanas

	Cimento	CCA/BT	CCA/MT	CCA/AT	S.A.	C.V.
Massa Específica (kg/dm ³) (NBR 6474, 1984)	3,08	2,16	2,16	2,16	2,18	2,03
Índice de Atividade Pozolânica (%) (NBR 5752, 1992)	100,0	77,8	89,5	80,6	81,7	58,6
Demanda de Água (%) (NBR 5752, 1992)	100	115	115	115	133	109
D10 (µm) – 10 % do volume com partículas de diâmetro abaixo de: (Granulometria por Difração à Laser)	1,39	2,58	2,17	2,17	4,32	6,04
D50 (µm) – 50 % do volume com partículas de diâmetro abaixo de: (Granulometria por Difração à Laser)	12,13	13,43	12,71	13,38	12,34	49,72
D90 (µm) – 90 % do volume com partículas de diâmetro abaixo de: (Granulometria por Difração à Laser)	35,08	39,04	39,05	40,98	20,36	127,52

Tabela 16 – Características químicas das pozolanas (Fluorescência de Raios-X)

Óxidos (%)	CCA/BT	CCA/MT	CCA/AT	SA	CV
SiO ₂	86,71	90,55	83,97	94,48	57,53
Al ₂ O ₃	0,36	0,16	0,14	0,14	28,02
Fe ₂ O ₃	0,76	0,14	0,01	0,00	5,77
CaO	0,46	0,44	0,42	0,28	1,43
Na ₂ O	0,11	0,05	0,04	0,36	0,42
K ₂ O	0,84	0,73	0,68	0,86	2,83
MnO	0,20	0,20	0,19	0,02	0,05
TiO ₂	0,02	0,01	0,02	0,01	1,39
MgO	0,68	0,76	0,66	0,75	0,57
P ₂ O ₅	0,60	0,57	0,67	0,10	0,25
Perda ao Fogo	9,27	6,38	13,20	3,00	1,75

Dentre os ensaios de caracterização das pozolanas, também foi realizado o ensaio de diferença de condutividade idealizado por LÚXAN (1989), para determinação do índice de atividade pozolânica. Este ensaio mede a variação da condutividade iônica de uma solução saturada de Ca(OH)₂, fazendo-se a medição da condutividade iônica antes e após 2 minutos da adição e mistura continuada de 5 gramas de pozolana em 200 ml da solução. A idéia de se completar a caracterização das pozolanas com a realização deste ensaio se deve ao fato de que o foco de atenção deste ensaio se dá na reatividade química da pozolana. Nele mede-se a capacidade da sílica da pozolana entrar rapidamente em solução e reagir com o hidróxido de cálcio formando silicato de cálcio hidratado, que precipita como composto insolúvel, diminuindo

a concentração de íons cálcio da solução. Isso significa que, diferentemente do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica com Cimento (NBR5752, 1992), que mede o desempenho de uma pozolana com relação à resistência à compressão de uma argamassa padrão, o ensaio de LUXAN (1989) mede predominantemente o conteúdo de material com alta reatividade química da pozolana. Isso pode ser importante por possibilitar a análise do desempenho das cinzas com outra perspectiva além do Índice de Atividade Pozolânica com Cimento (NBR 5752, 1992). Além disso, pela rapidez e facilidade com que o ensaio pode ser realizado, ele possui um grande potencial para se tornar um ensaio de controle de qualidade durante a produção de uma pozolana, possibilitando ajustes contínuos nos processos, de forma a minimizar a variabilidade, como, por exemplo, durante a queima da casca ou durante a moagem da cinza.

Este ensaio foi feito com as três amostras de cinza de casca de arroz (CCA/BT, CCA/MT e CCA/AT) após serem moídas em moinho de bolas por duas horas, também com a amostra de sílica ativa (SA), com a amostra de cinza volante (CV), e ainda com uma porção separada da amostra da Cinza de Casca de Arroz de Baixo Teor de Carbono (CCA/BT) antes da moagem, que, por este motivo, foi denominada de Cinza de Casca de Arroz de Baixo Teor de Carbono Integral (CCA/BT/Integral). A tabela 17 reproduz os resultados encontrados.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios de diferença de condutividade das pozolanas

DIFERENÇA DE CONDUTIVIDADE (miliSiemens – mSi)					
CCA/BT/Integral	CCA/BT	CCA/MT	CCA/AT	SA	CV
4,485	5,615	3,905	2,985	1,1	0,597

Aqui já é interessante observar que as cinzas de casca de arroz produzem diferenças de condutividade muito maiores do que a cinza volante e mesmo do que da sílica ativa, esta última considerada uma superpozolana. Isso indica que a capacidade da cinza de casca de arroz entrar em solução de imediato é muito maior que nas outras pozolanas, ou seja, ela tem uma reatividade química muito maior. Verifica-se que, mesmo a cinza de casca de arroz que não sofreu nenhum processo de moagem, possui valores de diferença de condutividade cerca de 4 vezes a da sílica ativa. Mostra, também, que a moagem aumenta a reatividade, como era de se esperar, pois deve aumentar a superfície específica. Nota-se ainda que as cinzas provenientes de leito fluidizado, que contêm mais carbono, são menos reativas quimicamente que a cinza branca e, por sua vez, a cinza de leito fluidizado requeimada, que foi diminuído seu conteúdo de carbono, teve aumentada sua reatividade química, como também era de se esperar. Importante ressaltar que a cinza volante utilizada apresentou um índice de atividade pozolânica muito baixo, uma vez que 75% é o limite mínimo por norma para que possa ser utilizada em cimentos no Brasil.

5.3 – DOSAGEM DE MISTURAS PARA CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Foram dosadas 20 misturas de concreto contemplando diferentes teores de pozolanas e diferentes relações água/cimento (a/c), mesmo que mantendo constante a relação água/aglomerante (a/aglo). Com a decisão de fazer o estudo das misturas em volume, e não em massa como é mais comum, primeiramente escolheu-se um valor razoável da relação água/aglomerante em massa para concreto de alto desempenho, que foi de 0,35. Este foi o valor usado para dosar a mistura de concreto de referência, sem nenhuma substituição de cimento por pozolana. Em seguida esta relação água/aglomerante em massa foi transformada em relação volumétrica, e o valor fixado para todos os outros traços que iriam conter cimento e pozolanas.

Logo os traços dosados tiveram a mesma relação água/aglomerante em volume, cujo valor foi de 1,078, uma vez que o cimento utilizado possuía massa específica de 3,08 g/cm³. Para manter esta relação constante em misturas com diferentes teores de pozolanas e, ainda, manter os concretos com semelhantes teores de pasta e argamassa, a cada volume de pozolana adicionado o mesmo volume de cimento foi suprimido.

Foram dosados concretos com teores de substituição volumétrica de cimento por pozolana de 7, 14, 21 e 35 %, que equivalem em massa, dependendo das massas específicas do cimento e da pozolana utilizada, em valores por volta de 5, 10, 15 e 25 % respectivamente, teores estes freqüentemente relatados na literatura. As pozolanas utilizadas foram uma Sílica Ativa, a Cinza de Casca de Arroz de Baixo Teor de Carbono (CCA/BT) obtida nos experimentos anteriores, uma mistura de Sílica Ativa com Cinza Volante na proporção volumétrica de 3:4 e uma mistura de CCA/BT com Cinza Volante na mesma proporção. Foi feito um traço de referência só com cimento, como mencionado anteriormente e, também, um traço com substituição volumétrica de 14 % de cinza volante. Dois traços extras com 14 % de cinza de casca de arroz foram ainda feitos para contemplarem o uso das cinzas de casca de arroz de médio (CCA/MT) e de alto (CCA/AT) teor de carbono. A tabela 18 resume os traços mostrando sua composição em termos de substituição volumétrica de cimento pelas pozolanas e o códigos adotados.

Para que todos os concretos possuíssem as mesmas proporções em volume de materiais, ou com variações mínimas entre essas proporções, escolheu-se por controlar a consistência dos mesmos através de diferentes teores de superplastificante. Fez-se esta opção para poder estudar os diferentes concretos com mesmos teores de argamassa e de pasta, eliminando-se o efeito destas variáveis nas propriedades do concreto. Para todas as misturas foi adotado um abatimento de 210 ± 30 mm segundo a recomendação feita por DE LARRARD (1995-a).

Tabela 18 – Resumo das proporções volumétricas dos aglomerantes para as misturas

Número	% V.Cim	%V.SA	%V.CCA/BT	%V.CV	Código
1	100				C
2	93	7			7S
3	86	14			14S
4	79	21			21S
5	65	35			35S
6	93		7		7A
7	86		14		14A
8	79		21		21A
9	65		35		35A
10	93	1		6	1S6V
11	86	2		12	2S12V
12	79	3		18	3S18V
13	65	5		30	5S30V
14	93		3	4	3A4V
15	86		6	8	6A8V
16	79		9	12	9A12V
17	65		15	20	15A20V
18	86			14	14V
19	86		14 % CCA/MT		14A/MT
20	86		14 % CCA/AT		14A/AT

Tabela 19 - Quantidade em volume por betonada dos materiais das pastas dos concretos

Código	Cimento (dm ³)	SA (dm ³)	CCA/BT (dm ³)	CV (dm ³)	Agua (dm ³)	Vplast (dm ³)	Vsuper (dm ³)
C	3,205	0	0	0	3,455	0,0422	0,1975
7S	2,981	0,224	0	0	3,455	0,0422	0,1289
14S	2,756	0,449	0	0	3,455	0,0422	0,2446
21S	2,532	0,673	0	0	3,455	0,0422	0,1744
35S	2,083	1,122	0	0	3,455	0,0422	0,2446
7A	2,981	0	0,224	0	3,455	0,0422	0,2446
14A	2,756	0	0,449	0	3,455	0,0422	0,1496
21A	2,532	0	0,673	0	3,455	0,0422	0,2446
35A	2,083	0	1,122	0	3,755	0,0422	0,3273
1S6V	2,981	0,032	0	0,190	3,455	0,0422	0,1661
2S12V	2,756	0,064	0	0,381	3,455	0,0422	0,1785
3S18V	2,532	0,096	0	0,571	3,455	0,0422	0,1455
5S30V	2,083	0,160	0	0,952	3,455	0,0422	0,1165
3A4V	2,981	0	0,096	0,127	3,455	0,0422	0,2446
6A8V	2,756	0	0,192	0,254	3,455	0,0422	0,2446
9A12V	2,532	0	0,288	0,381	3,455	0,0422	0,2446
15A20V	2,083	0	0,481	0,635	3,455	0,0422	0,2446
14V	2,756	0	0	0,444	3,455	0,0422	0,1702
14A/MT	2,756	0	0,449 *	0	3,455	0,0422	0,2446
14A/AT	2,756	0	0,449 dm ³ **	0	3,455	0,0422	0,2446

*CCA/MT **CCA/AT

A tabela 19 mostra as quantidades de cada mistura em volume e a tabela 20 mostra as quantidades de cada mistura em massa (quantidades de materiais por betonada). Todas as misturas tiveram as mesmas quantidades de agregados por betonada, sendo 10,764 kg de areia e 19,080 kg de brita. A tabela 21 mostra os valores calculados para os volumes de materiais por metro cúbico de concreto e a tabela 22 os valores em massa. Não foi considerado volume de ar incorporado.

Para cada mistura, foram moldados 9 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. De cada traço, e a cada idade, dois corpos de prova foram ensaiados à compressão com 1, 3, 28 e 63 dias. Alternativamente ao capeamento dos corpos de prova com enxofre para o ensaio de resistência à compressão, adotou-se o método “sand box” proposto por BOULAY & DE LARRARD (1993). De resto foram adotados os procedimentos recomendados pela norma NBR 5739 (1974). O nono corpo de prova de cada concreto foi utilizado para ensaios de penetração acelerada de cloretos. De cada dupla, o maior valor foi escolhido para representar o valor da resistência à compressão daquela mistura, naquela idade. A tabela 23 mostra os resultados dos ensaios de resistência à compressão. Na tabela 24 estão os resultados dos ensaios de penetração acelerada de cloretos realizados à idade de 56 dias.

Tabela 20 - Quantidade em massa por betonada dos materiais das pastas dos concretos

Código	Cimento (kg)	SA (kg)	CCA/BT (kg)	CV (kg)	Água (kg)	Plast. (kg)	Super (kg)
C	9,871	0	0	0	3,455	0,049	0,239
7S	9,18	0,489	0	0	3,455	0,049	0,156
14S	8,489	0,979	0	0	3,455	0,049	0,296
21S	7,798	1,467	0	0	3,455	0,049	0,211
35S	6,416	2,445	0	0	3,455	0,049	0,296
7A	9,182	0	0,484	0	3,455	0,049	0,296
14A	8,489	0	0,969	0	3,455	0,049	0,181
21A	7,798	0	1,454	0	3,455	0,049	0,296
35A	6,416	0	2,423	0	3,755	0,049	0,396
1S6V	9,18	0,07	0	0,39	3,455	0,049	0,201
2S12V	8,489	0,14	0	0,781	3,455	0,049	0,216
3S18V	7,798	0,21	0	1,171	3,455	0,049	0,176
5S30V	6,416	0,349	0	1,952	3,455	0,049	0,141
3A4V	9,18	0	0,208	0,26	3,455	0,049	0,296
6A8V	8,489	0	0,415	0,52	3,455	0,049	0,296
9A12V	7,798	0	0,623	0,781	3,455	0,049	0,296
15A20V	6,416	0	1,038	1,301	3,455	0,049	0,296
14V	8,489	0	0	0,91	3,455	0,049	0,206
14A/MT	8,489	0	0,969 *	0	3,455	0,049	0,296
14A/AT	8,489	0	0,969 **	0	3,455	0,049	0,296

*CCA/MT **CCA/AT

Tabela 21 – Volumes de materiais por metro cúbico de concreto

Código	cimento (dm³/m³)	SA (dm³/m³)	CCA/BT (dm³/m³)	CV (dm³/m³)	Água (dm³/m³)	Plast (dm³/m³)	Super (dm³/m³)	Areia (dm³/m³)	Brita (dm³/m³)
C	175,7	0,0	0,0	0,0	189,4	2,3	10,8	227,0	394,7
7S	164,0	12,3	0,0	0,0	190,1	2,3	7,1	227,8	396,2
14S	150,7	24,6	0,0	0,0	188,9	2,3	13,4	226,4	393,7
21S	139,0	36,9	0,0	0,0	189,7	2,3	9,6	227,3	395,2
35S	113,9	61,3	0,0	0,0	188,9	2,3	13,4	226,4	393,7
7A	163,0	0,0	12,3	0,0	188,9	2,3	13,4	226,4	393,7
14A	151,5	0,0	24,7	0,0	189,9	2,3	8,2	227,6	395,8
21A	138,5	0,0	36,8	0,0	188,9	2,3	13,4	226,4	393,7
35A	111,6	0,0	60,1	0,0	201,1	2,3	17,5	221,8	385,7
1S6V	163,7	1,8	0,0	10,6	189,8	2,3	9,1	227,4	395,4
2S12V	151,3	3,5	0,0	21,1	189,6	2,3	9,8	227,2	395,2
3S18V	139,2	5,3	0,0	31,7	190,0	2,3	8,0	227,6	395,9
5S30V	114,7	8,8	0,0	53,0	190,3	2,3	6,4	228,0	396,5
3A4V	163,0	0,0	5,3	7,0	188,9	2,3	13,4	226,4	393,7
6A8V	150,7	0,0	10,5	14,0	188,9	2,3	13,4	226,4	393,7
9A12V	138,5	0,0	15,8	21,0	188,9	2,3	13,4	226,4	393,7
15A20V	113,9	0,0	26,3	35,0	188,9	2,3	13,4	226,4	393,7
14V	151,3	0,0	0,0	24,6	189,7	2,3	9,3	227,3	395,3
14A/MT	150,7	0,0	24,5 *	0,0	188,9	2,3	13,4	226,4	393,7
14A/AT	150,7	0,0	24,5 **	0,0	188,9	2,3	13,4	226,4	393,7

*CCA/MT **CCA/AT

Tabela 22 – Massa de materiais por metro cúbico de concreto

Código	cimento (kg/m³)	SA (kg/m³)	CCA/BT (kg/m³)	CV (kg/m³)	Água (kg/m³)	Plast (kg/m³)	Super (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Brita (kg/m³)
C	541,2	0,0	0,0	0,0	189,4	2,7	13,1	590,1	1046,1
7S	505,2	26,9	0,0	0,0	190,1	2,7	8,6	592,4	1050,0
14S	464,2	53,5	0,0	0,0	188,9	2,7	16,2	588,6	1043,4
21S	428,1	80,5	0,0	0,0	189,7	2,7	11,6	590,9	1047,4
35S	350,9	133,7	0,0	0,0	188,9	2,7	16,2	588,6	1043,4
7A	502,1	0,0	26,5	0,0	188,9	2,7	16,2	588,6	1043,4
14A	466,6	0,0	53,3	0,0	189,9	2,7	9,9	591,7	1048,8
21A	426,4	0,0	79,5	0,0	188,9	2,7	16,2	588,6	1043,4
35A	343,7	0,0	129,8	0,0	201,1	2,6	21,2	576,6	1022,0
1S6V	504,2	3,8	0,0	21,4	189,8	2,7	11,0	591,2	1047,9
2S12V	465,9	7,7	0,0	42,9	189,6	2,7	11,9	590,8	1047,2
3S18V	428,8	11,5	0,0	64,4	190,0	2,7	9,7	591,8	1049,1
5S30V	353,3	19,2	0,0	107,5	190,3	2,7	7,8	592,8	1050,7
3A4V	502,0	0,0	11,4	14,2	188,9	2,7	16,2	588,6	1043,4
6A8V	464,2	0,0	22,7	28,4	188,9	2,7	16,2	588,6	1043,4
9A12V	426,4	0,0	34,1	42,7	188,9	2,7	16,2	588,6	1043,4
15A20V	350,9	0,0	56,8	71,1	188,9	2,7	16,2	588,6	1043,4
14V	466,1	0,0	0,0	50,0	189,7	2,7	11,3	591,0	1047,7
14A/MT	464,2	0,0	53,0 *	0,0	188,9	2,7	16,2	588,6	1043,4
14A/AT	464,2	0,0	53,0 **	0,0	188,9	2,7	16,2	588,6	1043,4

*CCA/MT **CCA/AT

Tabela 23 – Resistência à compressão dos concretos a cada idade (NBR 5739, 1974)

Código	Resistência à compressão em MPa (Maior valor entre dois CPs)			
	1 dia	3 dias	28 dias	63 dias
C	28,7	45,6	57,4	61,8
7S	28,7	48,7	69,3	76,1
14S	29,3	46,2	73,0	78,6
21S	26,8	47,4	76,1	82,4
35S	22,5	39,3	79,9	82,4
7A	28,1	46,2	61,1	63,6
14A	28,1	44,3	66,1	70,5
21A	28,7	48,7	66,1	67,4
35A	20,6	46,2	59,3	66,1
1S6V	26,2	43,1	58,7	64,3
2S12V	22,5	39,9	52,4	57,4
3S18V	18,1	36,8	49,3	56,2
5S30V	15,0	33,1	48,7	61,1
3A4V	22,5	41,2	51,8	57,4
6A8V	18,7	39,9	54,3	58,7
9A12V	17,5	37,4	53,7	54,3
15A20V	16,9	38,7	54,9	63,0
14V	21,2	36,8	49,3	54,9
14A/MT	20,6	38,7	46,2	61,1
14A/AT	18,7	43,1	62,4	66,1

Tabela 24 – Resultados dos ensaios de penetração acelerada de cloretos (ASTM C-1202,1994)

Código	Q (Coulombs)	Código	Q (Coulombs)
C	3663	2S12V	1175
7S	403	3S18V	794
14S	203	5S30V	583
21S	104	3A4V	2304
35S	24	6A8V	1794
7A	1426	9A12V	855
14A	584	15A20V	587
21A	392	14V	2850
35A	224	14A/MT	717
1S6V	2014	14A/AT	718

O ensaio de penetração acelerada de cloretos segundo a norma ASTM C 1202 tem sido criticado por alguns autores, porque a carga elétrica total não representaria a real penetração de cloretos, para avaliar com fidedignidade a permeabilidade a este íon (ISAIA, 1996-b). No entanto esse ensaio é bastante utilizado como referência quando se deseja comparar resultados de diferentes concretos. ISAIA (1996-b) publicou um trabalho em que avalia esse ensaio e chegou a conclusão que ele parece confiável para avaliar a quantidade total de cloretos retidos para

concretos de elevado desempenho com pozolanas. Entretanto, ISAIA (1996-b) encontrou, dentre outros problemas, correspondência inversa entre os valores para penetração de cloretos e resultados de ensaio de carbonatação de seus concretos. Tende-se, em função disso, a concluir que o ensaio de penetração de cloretos não deve ser usado como um ensaio universal que represente a capacidade de um concreto durar frente às mais diversas formas de agressão, mas tão somente à capacidade de resistir à penetração de íons cloreto.

Apesar disso, para o presente trabalho esse ensaio foi escolhido como representativo da durabilidade, pelo menos no que tange a concretos especialmente sujeitos ao ataque por cloretos, em função da disponibilidade de equipamento para esse ensaio no laboratório de materiais de construção da UFSC, e da utilização no presente trabalho da grande massa de dados do trabalho de ISAIA (1995), onde esse ensaio foi realizado para um grande número de traços de concreto para avaliar a capacidade das diferentes misturas endurecidas de resistirem à penetração de íons cloreto.

5.4 – COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES POZOLÂNICAS ENTRE AS CINZAS DE CASCA DE ARROZ E DESTAS EM RELAÇÃO ÀS OUTRAS POZOLANAS

Quando se procura avaliar os teores de carbono de uma cinza, logo se pensa no ensaio de perda ao fogo. No entanto, se observarmos os resultados de perda ao fogo para as cinzas de casca de arroz, notar-se que a cinza branca aparece com uma perda de 9,27 %, enquanto que a cinza requeimada com 6,38 %, e a cinza de leito fluidizado não requeimada com 13,20%. Uma referência feita no item 3.5.1 pode ajudar a explicar o fenômeno. HOUSTON (1972) afirma que boa parte da sílica presente na casca de arroz está na forma opalina, uma fase hidro-amorfa. Logo, a água presente faz parte da estrutura do vidro de sílica, e pode não ser eliminada nas temperaturas de queima da casca, principalmente em queimas efetuadas com melhores controles nos tempos de aquecimento e limites de temperatura. Já no ensaio de perda ao fogo, com temperaturas muito maiores, há quebra de ligações químicas mais fortes, eliminado água, e alterando os valores do ensaio quando se esperava obter valores do conteúdo de carbono. Como para o presente trabalho não havia disponibilidade de utilização de outro método mais preciso para determinação dos teores de carbono, teve-se que aceitar essas limitações. De qualquer forma, a cor das cinzas mostradas nas fotografias comprova os bons resultados obtidos na eliminação do carbono indesejável.

No item 5.2 do presente capítulo, foi também observado que a casca de arroz possui

diferenças de condutividade muito maiores que das outras pozolanas, indicando maior reatividade química. Mostra ainda que, quanto menor o teor de carbono das cinzas, maior a diferença de condutividade. Importante ressaltar que a cinza de casca de arroz integral (que não foi moída) também possui alta reatividade química, como indicam os ensaios, mesmo que desta forma não possua bom desempenho para adição ao concreto. A alta reatividade química pode ser explicada pela altíssima superfície específica dos grãos, que possuem alta porosidade microscópica, como foi mostrado nas micrografias do capítulo III. Ao mesmo tempo, explica-se o seu desempenho ruim quando não são devidamente moídas porque, além de não desempenharem corretamente o efeito microfíler, ainda absorvem grandes quantidades de água de amassamento do concreto.

Foi mencionado anteriormente que as cinzas de casca de arroz foram moídas em moinho de bolas por um período de duas horas. O moinho utilizado foi o mesmo utilizado por SANTOS (1997), que estudou tempos ideais de moagem para cinzas residuais provenientes de queima em leito fluidizado, ou seja, cinzas com altos teores de carbono. Naquele trabalho chegou-se à um tempo ideal de 6 horas de moagem. Verificou-se que as resistências dos concretos cresciam acentuadamente com os tempos de moagem, sendo que, após 6 horas o crescimento se dava muito mais vagarosamente, o que foi considerado anti-econômico.

Entretanto, para o presente trabalho, foi feita a opção de um tempo reduzido a somente 2 horas de moagem. Esta escolha foi feita para que uma moagem intensa não acabasse igualando as diferentes cinzas, tanto pelo aspecto de aumento na superfície específica, quanto em relação à intensificação do efeito microfíler. Além disso, caso fosse encontrado um bom comportamento para as cinzas a um tempo de moagem menor, isto implicaria em uma grande vantagem econômica, posto que os custos de moagem são um dos principais fatores limitantes à disseminação do uso da cinza de casca de arroz na produção de concreto. Estas observações são importantes para analisar os resultados das comparações feitas a seguir.

Uma das características mais importantes do concreto é a resistência à compressão e sabe-se que tipos e teores de diferentes pozolanas possuem influencia significativa. Para poder comparar a influência das cinzas, foi construído o gráfico da figura 30 que faz uma comparação das resistências à compressão dos concretos de mesma relação água/aglomerante para teores de substituição de pozolana de 14 % em volume.

Do gráfico, pode-se perceber que a cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono (CCA/BT), cinza de cor branca, teve o melhor desempenho entre as cinzas de casca de arroz. Mesmo tendo sido moída por apenas 2 horas, ela teve desempenho bem superior à cinza volante, mas ficou um pouco abaixo do desempenho da sílica ativa. Percebe-se também que a cinza de

casca de arroz requeimada (CCA/MT), teve desempenho pior que a cinza original (CCA/AT), a preta, mas pode-se tentar explicar o fenômeno. Quando a cinza é requeimada para diminuir seu conteúdo de carbono, os vazios dos grãos aumentam na mesma proporção, o que deve implicar em aumento na superfície específica, e conseqüente aumento na reatividade química. Entretanto, isso também implica em maior porosidade, maior absorção de água de amassamento pela cinza, maior coesão da massa de concreto, e menor capacidade de eliminar o ar incorporado através de vibração, com conseqüente menor resistência.

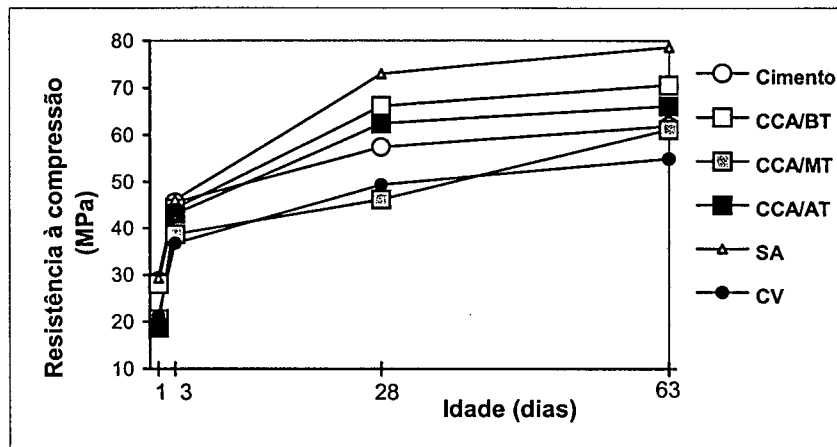


Figura 30 – Resistências à compressão dos concretos com 14 % de substituição pozolânica

De qualquer forma, o gráfico mostra que as cinzas de casca de arroz produzem concretos de boa performance e que, o aumento na moagem da cinza de casca de arroz requeimada, deve resolver o problema do menor desempenho em relação à cinza de leito fluidizado não requeimada. Vê-se ainda que a ótima performance da cinza branca, com moagem de apenas 2 horas, leva a crer que este tipo de cinza teria um excelente desempenho, superior à sílica ativa, se os tempos de moagem forem maiores que 2 horas. Mas talvez seja necessário bem menos do que as 6 horas sugeridas por SANTOS (1997) para as cinzas de leito fluidizado.

GUEDERT (1989) já havia estudado a influência do tempo de moagem da cinza de casca de arroz no índice de pozolanicidade do material. Ao contrário do que se poderia imaginar, o aumento no tempo de moagem da cinza revelou que isso não só provocava um aumento no índice de pozolanicidade e na superfície específica do pó, mas também uma diminuição na demanda de água de amassamento no ensaio de atividade pozolânica com cimento Portland (NBR 5751, 1977).

No capítulo III foram mostradas algumas micrografias da cinza de casca de arroz antes da moagem, que mostram a estrutura altamente porosa, responsável pela tendência à alta absorção

de água destas cinzas. A micrografia da figura 31 mostra a cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono, após a moagem por duas horas, onde pode ser observado que a estrutura de poros se fecha (ou se pulveriza) com a moagem. Além disso, quanto maior a moagem, melhor a distribuição granulométrica do material, e mais arredondadas devem se tornar as partículas. E isto explica porque a moagem aumenta a superfície específica, mas diminui a demanda de água da cinza de casca de arroz.

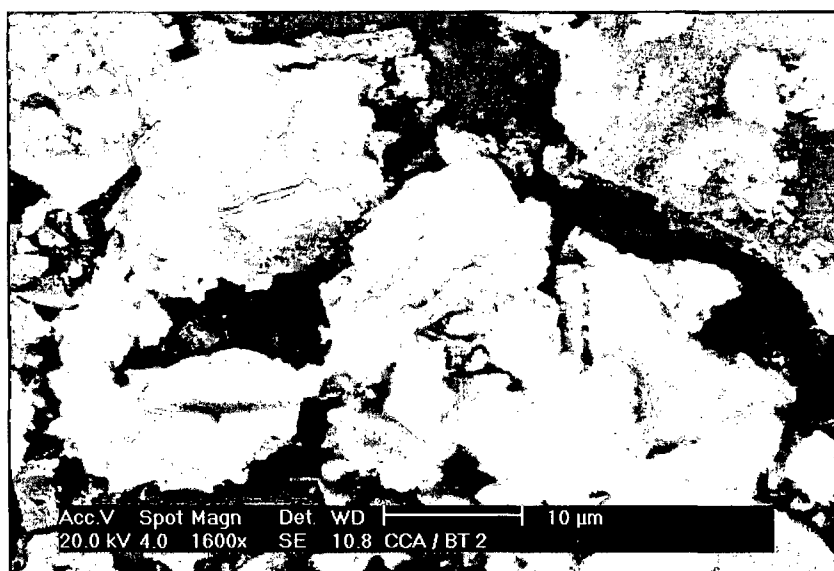


Figura 31 – Cinza de casca de arroz após moagem por duas horas

No final do capítulo IV, foi mostrado que não houve modificação considerável no difratograma da cinza de casca de arroz proveniente de leito fluidizado quanto esta foi levada à requeima para redução de seu conteúdo de carbono. Pôde-se ainda verificar que a cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono também possuía difratograma característico de material essencialmente vítreo, pois não aparece nenhum pico indicando presença de material cristalino.

Nas figuras 32 e 33 são apresentados os difratogramas da sílica ativa e da cinza volante, onde pode ser observado que a sílica ativa também é essencialmente vítrea, mas a cinza volante possui difratograma que revela picos cristalinos bem definidos e de elevada intensidade. Isso explica o baixo desempenho desta cinza volante, já que a reatividade de uma pozolana é dependente da energia disponível pela distorção da estrutura cristalina, quando no resfriamento não há tempo suficiente para o material cristalizar, resultando numa estrutura amorfa (vítrea).

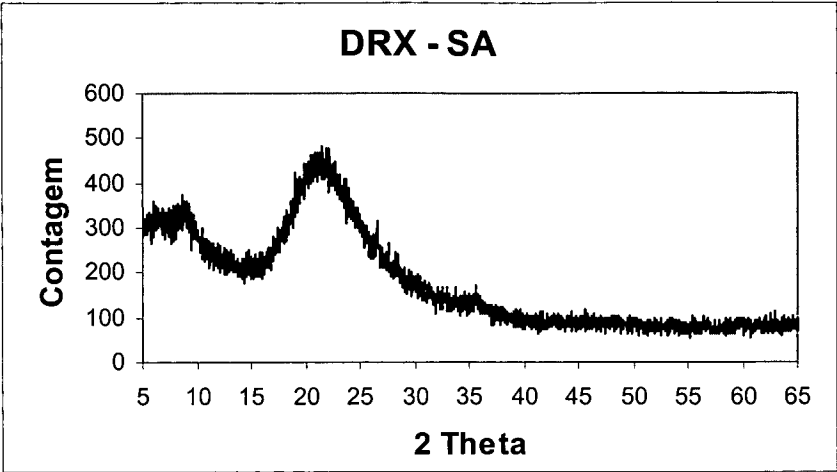


Figura 32 – Difratoograma de Raios-X da sílica ativa

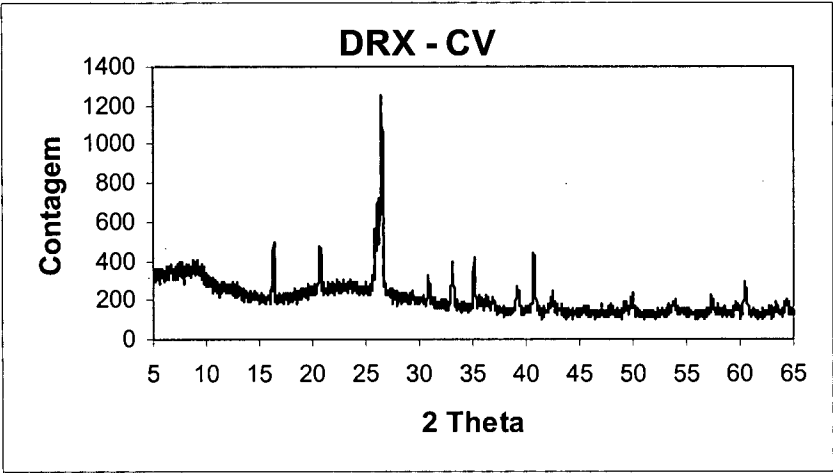


Figura 33 – Difratoograma de Raios-X da cinza volante

Por fim, analisando o desempenho dos concretos com relação à penetração acelerada de cloretos, observa-se que a requeima da cinza de casca de arroz de leito fluidizado não muda seu desempenho com relação a esta variável. Nota-se que a cinza de casca de arroz de baixo teor de carbono teve melhor desempenho entre as cinzas de casca de arroz, mas inferior à sílica ativa. Verifica-se ainda, que somente a cinza volante não apresenta desempenho tão bom quanto às outras cinzas com relação à penetração acelerada a cloretos. O quadro da tabela 25 mostra os valores estipulados pela norma ASTM C 1202 para avaliar a qualidade do concreto quanto à capacidade de resistir ao ataque de cloretos, e a tabela 26 mostra os resultados obtidos para os concretos com substituição de 14 % em volume de cimento por pozolana.

Tabela 25 – Valores da norma ASTM C-120 para a penetração e cloretos

Carga medida (Coulombs)	Penetração	Observações
> 4000	Alta	concreto comum a/c > 0,6
2000 – 4000	Moderada	idem a/c entre 0,4 e 0,5
1000 – 2000	Baixa	idem a/c < 0,4
100 – 1000	Muito baixa	concreto látex modificado
< 100	Desprezível	concreto polímero

Tabela 26 – Penetração de cloretos para os concretos com 14 % de substituição pozolânica

Pozolana	Carga Medida (Coulombs)
CCA/BT	584
CCA/MT	717
CCA/AT	718
SA	203
CV	2850
Sem pozolana	3663

CAPÍTULO VI

ESTUDO ESTATÍSTICO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO EM FUNÇÃO DOS VOLUMES DE MATERIAIS DA PASTA

6.1 – REGRESSÃO MÚLTIPLA ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO E DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS, EM FUNÇÃO DOS VOLUMES DE MATERIAIS DA PASTA

Para tentar explicar a resistência à compressão do concreto de alto desempenho em função das relações volumétricas entre os componentes da pasta, dado um conjunto de materiais, foram realizadas várias regressões múltiplas. Muitas tentativas foram feitas para correlacionar a resistência à compressão com variáveis criadas para representar as relações volumétricas entre os componentes do concreto, e suas propriedades intrínsecas, isto é, cada conjunto de materiais. O objetivo foi o de encontrar um meio prático para auxiliar a dosagem de concretos de alto desempenho, através de uma equação (curva de dosagem), construída a partir de algumas poucas misturas, do mesmo modo como se faz com os concretos convencionais, ao utilizar a Lei de Abrams. Dentre as relações que apresentaram bons índices de correlação na regressão múltipla, apresenta-se, a seguir, uma forma que parece bastante satisfatória, pois foram encontrados ótimos índices de correlação para as várias idades.

Fazendo-se regressões múltiplas entre a variável dependente Resistência à Compressão com as variáveis independentes Volume de Aglomerante/Volume de pasta (V_{aglo}/V_{pasta}), Volume de Cimento/Volume de Aglomerante (V_{cim}/V_{aglo}), Volume de Sílica Ativa/Volume de Aglomerante (V_{sa}/V_{aglo}), e Volume de Cinza de Casca de Arroz/Volume de Aglomerante (V_{cca}/V_{aglo}), nas idades de 1, 3, 28 e 63 dias, para as 18 misturas estudadas, obteve-se os índices de correlação apresentados na tabela 27. Esta tabela apresenta um resumo de índices de correlação na regressão múltipla de duas formas distintas, sendo a primeira com todas as misturas de concreto, isto é, misturas com até 35 % de substituição volumétrica de cimento por pozolana, e a segunda eliminando-se os concretos com 35 % de pozolana, ou seja, para essas regressões somente foram usados os valores das misturas com até 21 % de substituição volumétrica de cimento por pozolana. Isto foi feito porque as misturas com 35 % de pozolana apresentaram-se muito coesas, e a influência da dificuldade de eliminação do ar incorporado

devido à dificuldade de adensamento poderia influenciar significativamente os resultados das regressões. A variável Volume de Cinza Volante/Volume do Aglomerante (V_{cv}/V_{aglo}) não é utilizada diretamente nas análises estatísticas pois já está permanentemente implícita no conjunto das outras variáveis, ou seja, seu valor é 1 menos a soma das variáveis V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} e V_{cca}/V_{aglo} . No anexo “A” encontram-se os resumos de todas essas análises de regressão.

Tabela 27 – Índices de correlação na regressão múltipla entre resistência à compressão com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} , V_{cca}/V_{aglo}

Número de observações	Teor máximo de pozolana	1 dia	3 dias	28 dias	63 dias
18	35 %	0,9244	0,8953	0,9687	0,9137
14	21 %	0,9213	0,9504	0,9781	0,9812

Como pode ser observado, foram encontrados excelentes índices de correlação nas regressões múltiplas efetuadas, especialmente para os concretos com até 21 % de pozolana e idades acima de 28 dias, confirmando a hipótese de que, para um dado conjunto de materiais, as relações entre os volumes ocupados pelos componentes da pasta podem explicar satisfatoriamente a resistência à compressão. Os menores índices de correlação nas idades menores podem ser justificados por variáveis não completamente controladas, como tempo entre moldagem e ensaio, ou temperatura de cura. Entretanto, os resultados demonstram um caminho possível para realização de estudos de dosagem, utilizando-se apenas das relações volumétricas entre os componentes. A equação encontrada pode servir para escolher uma proporção que apresente a melhor vantagem econômica, dada uma resistência à compressão especificada, já que tipos diferentes de pozolanas possuem também preços muito diferentes, e ainda porque elas influenciam de maneira diferente nos consumos de superplastificante.

Sendo objetivo do trabalho encontrar um meio que auxilie a dosagem de concretos de alto desempenho, e não apenas de alta resistência, é objetivo também o estudo de pelo menos uma variável que possa representar a durabilidade do concreto. Optou-se por tentar correlacionar a resistência à penetração de cloretos do concreto em função das mesmas variáveis que descreveram de forma adequada a resistência à compressão. Os ensaios de resistência à penetração de cloretos foram feitos com os concretos na idade de 56 dias. A tabela 28 relaciona novamente os valores encontrados para a penetração de cloretos pelo ensaio ASTM C-1202 (1994), mas coloca ainda os valores dos logaritmos da penetração de cloretos, pois foram esses segundos valores que apresentaram os melhores resultados na regressão. O valor do índice de

correlação foi de 0,9612 , para uma regressão múltipla que utilizou os valores de todos os concretos, como mostra o resumo da estatística de regressão da tabela 29.

Tabela 28 – Logaritmo da carga passante do ensaio de penetração acelerada de cloretos (56 dias)

Código	Q 56(Coulombs)	log Q56
C	3663	3,5638
7S	403	2,6048
14S	203	2,3070
21S	104	2,0187
35S	24	1,3758
7A	1426	3,1541
14A	584	2,7664
21A	392	2,5935
35A	224	2,3497
1S6V	2014	3,3041
2S12V	1175	3,0700
3S18V	794	2,8996
5S30V	583	2,7660
3A4V	2304	3,3625
6A8V	1794	3,2538
9A12V	855	2,9321
15A20V	587	2,7688
14V	2850	3,4549

Tabela 29 – Resumo da estatística de regressão múltipla da variável log Q a 56 dias em função das variáveis Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,961164
R-Quadrado	0,923835
R-quadrado ajustado	0,9004
Erro padrão	0,174236
Observações	18

Variável dependente: log Q56
Concretos com até 35 % de pozolana

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	4,786969	1,196742	39,42074	3,77E-07
Resíduo	13	0,394656	0,030358		
Total	17	5,181625			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	38,09862	21,79666	1,747911	0,10404	-8,99018	85,18743	-8,99018	85,18743
Vaglo/Vpasta	-45,7074	27,83052	-1,64235	0,124474	-105,832	14,41672	-105,832	14,41672
Vcim/Vaglo	6,087209	3,260907	1,866723	0,084654	-0,95755	13,13197	-0,95755	13,13197
Vsa/Vaglo	-8,52877	1,109011	-7,69043	3,44E-06	-10,9246	-6,1329	-10,9246	-6,1329
Vcca/Vaglo	-5,1678	1,301038	-3,97206	0,001594	-7,97852	-2,35708	-7,97852	-2,35708

Para que se possa fazer uma dosagem econômica, é preciso também poder prever os consumos de superplastificante, e isto é feito em função das mesmas variáveis utilizadas para prever a resistência à compressão e resistência à penetração de cloretos. Para isso tentou-se correlacionar o Volume de Superplastificante/Volume de Pasta (V_{super}/V_{pasta}) com as mesmas variáveis usadas anteriormente. As tabelas 30 e 31 mostram os resumos das estatísticas de regressão dos concretos com até 35% e 21 % de pozolana, respectivamente.

Apesar de todos os concretos terem sido programados para uma mesma relação volumétrica água/aglomerante, durante as dosagens, como o controle de consistência foi feito adicionando-se mais superplastificante após todos os outros materiais terem sido adicionados, há uma pequena variação nas relações V_{aglo}/V_{pasta} , e toda ela é devida à adição de superplastificante (somente a mistura 35A teve acréscimo de água). Isto prejudica o estudo estatístico porque a análise estatística acaba mostrando que o V_{super}/V_{pasta} é fortemente dependente do V_{aglo}/V_{pasta} , mas é claro, o V_{aglo}/V_{pasta} variou porque foi adicionado superplastificante. Porém, este problema não aconteceria para um estudo de dosagem onde fosse definido antecipadamente diferentes relações água/aglomerante, como será visto no estudo a seguir.

Tabela 30 – Estatística de regressão múltipla da variável V_{super}/V_{pasta} em função das variáveis V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} , V_{cca}/V_{aglo} , até 35% de pozolana.

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Variável dependente: V_{super}/V_{pasta} Concretos com até 35 % pozolana
R múltiplo	0,838393	
R-Quadrado	0,702902	
R-quadrado ajustado	0,611487	
Erro padrão	0,004697	
Observações	18	

ANOVA

	<i>gi</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	4	0,000679	0,00017	7,689152	0,002087
Resíduo	13	0,000287	2,21E-05		
Total	17	0,000965			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Interseção	0,446116	0,133763	3,335133	0,005372	0,15714	0,735093	0,15714	0,735093
V_{aglo}/V_{pasta}	-0,91916	0,280352	-3,27859	0,005989	-1,52482	-0,3135	-1,52482	-0,3135
V_{cim}/V_{aglo}	0,010202	0,014034	0,72696	0,480138	-0,02012	0,040521	-0,02012	0,040521
V_{sa}/V_{aglo}	0,010831	0,016812	0,644228	0,530631	-0,02549	0,04715	-0,02549	0,04715
V_{cca}/V_{aglo}	0,002353	0,025118	0,093663	0,926805	-0,05191	0,056617	-0,05191	0,056617

Tabela 31 – Estatística de regressão múltipla da variável V_{super}/V_{pasta} em função das variáveis V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} , V_{cca}/V_{aglo} , até 21% de pozolana.

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Variável dependente: V_{super}/V_{pasta} Concretos com até 21 % pozolana
R múltiplo	0,999983	
R-Quadrado	0,999967	
R-quadrado ajustado	0,999952	
Erro padrão	4,32E-05	
Observações	14	

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	0,000508	0,000127	68013,44	3,79E-20
Resíduo	9	1,68E-08	1,87E-09		
Total	13	0,000509			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	1,001679	0,002063	485,4317	3,4E-21	0,997011	1,006347	0,997011	1,006347
V_{aglo}/V_{pasta}	-2,09498	0,004369	-479,56	3,8E-21	-2,10487	-2,0851	-2,10487	-2,0851
V_{cim}/V_{aglo}	6,96E-05	0,000222	0,313192	0,761271	-0,00043	0,000572	-0,00043	0,000572
V_{sa}/V_{aglo}	0,000153	0,000231	0,661129	0,52509	-0,00037	0,000676	-0,00037	0,000676
V_{cca}/V_{aglo}	5,23E-05	0,000249	0,21045	0,838004	-0,00051	0,000614	-0,00051	0,000614

6.2 – ESTUDO SIMILAR DE REGRESSÃO MÚLTIPLA ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO, E DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS, EM FUNÇÃO DOS VOLUMES DE MATERIAIS DA PASTA, UTILIZANDO DADOS DE OUTROS AUTORES

No seu trabalho de doutorado, ISAIA (1995) fez um grande número de misturas para concreto de alto desempenho utilizando adições das pozolanas sílica ativa, cinza de casca de arroz e cinza volante. O autor fez todas as misturas em massa e processou os resultados de seu trabalho utilizando-se de relações em massa entre os materiais, do mesmo modo como tem sido feito pela quase totalidade dos pesquisadores.

Como o autor apresenta os valores das massas específicas de todos os materiais utilizados, foi possível para o presente trabalho, encontrar as relações em volume entre eles, o que possibilitou utilizar aquela importante massa de dados, para confirmar a validade de se

correlacionar a resistência à compressão, ou a resistência à penetração de cloretos, com as variáveis V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} e V_{cca}/V_{aglo} . Também foi possível verificar se o problema encontrado anteriormente, ao correlacionar o teor de superplastificante com aquelas variáveis, se repetiria num concreto dosado de outro modo, com diferentes relações água/aglomerante pré-fixados.

Para isso, foi feita a regressão múltipla entre a variável dependente resistência à compressão, com as variáveis independentes Volume de Aglomerante/Volume de pasta (V_{aglo}/V_{pasta}), o Volume de Cimento/Volume de Aglomerante (V_{cim}/V_{aglo}), o Volume de Sílica Ativa/Volume de Aglomerante (V_{sa}/V_{aglo}), e o Volume de Cinza de Casca de Arroz/Volume de Aglomerante (V_{cca}/V_{aglo}), para todas as idades, verificando a possibilidade de fazer estudos de dosagem somente com os valores das relações volumétricas entre os materiais e os resultados dos ensaios de resistência à compressão.

A tabela 32 mostra um resumo dos índices de correlação na regressão múltipla que foram encontrados. Os valores das relações volumétricas entre os materiais da pasta e as resistências à compressão das 39 misturas de concreto feitas por ISAIA (1995) encontram-se no **ANEXO B**, bem como os resumos das estatísticas da regressões efetuadas. Vê-se que os índices de correlação são excelentes e os resumos das estatísticas mostram a validade das regressões.

Tabela 32 – Índices de correlação na regressão múltipla entre resistência à compressão em função das variáveis V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} e V_{cca}/V_{aglo}

Número de observações	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
39	0,9724	0,9563	0,9625	0,9459

Procurou-se então correlacionar a resistência à penetração de cloretos, através do logaritmo da carga, com as variáveis V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} e V_{cca}/V_{aglo} , dos concretos produzidos por ISAIA (1995), do mesmo modo feito no item 6.1 para os concretos produzidos no presente trabalho. A tabela 33 mostra o resumo da estatística de regressão de Log Q 91 com essas variáveis. Todas as regressões realizadas com os dados do trabalho de ISAIA (1995) estão no **ANEXO B**. Nele estão os resultados de regressões usando todo o conjunto de dados, em seguida as regressões usando somente os dados dos concretos que não possuíam cinza de casca de arroz e, por último, com todos os concretos que não possuíam sílica ativa.

Tabela 33 - Estatística de regressão múltipla da variável log Q (91 dias) em função das variáveis Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo do trabalho de ISAIA (1995)

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Variável dependente: log Q91			
R múltiplo	0,96131	Todos os traços			
R-Quadrado	0,924116				
R-quadrado ajustado	0,915189				
Erro padrão	0,101233				
Observações	39				

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	4,243291	1,060823	103,5133	1,53E-18
Resíduo	34	0,348438	0,010248		
Total	38	4,591729			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	3,171482	0,180337	17,5864	1,21E-18	2,804993	3,537971	2,804993	3,537971
Vaglo/Vpasta	-1,60724	0,312759	-5,13891	1,13E-05	-2,24284	-0,97163	-2,24284	-0,97163
Vcim/Vaglo	0,730087	0,098349	7,423459	1,31E-08	0,530218	0,929955	0,530218	0,929955
Vsa/Vaglo	-3,0801	0,204866	-15,0347	1,38E-16	-3,49644	-2,66377	-3,49644	-2,66377
Vcca/Vaglo	-0,70889	0,142921	-4,96	1,94E-05	-0,99933	-0,41844	-0,99933	-0,41844

Vê-se que o resultado da regressão foi muito bom, demonstrando a viabilidade de se escolher uma mistura de materiais de acordo com as necessidades de durabilidade de um concreto. É importante salientar que a mesma regressão foi feita para a idade de 28 dias e o resultado não foi tão bom, dando um índice de correlação de 0,8578. Isso não deve parecer estranho já que as pozolanas têm forte atuação na capacidade de diminuir a penetração dos íons cloretos e pelo fato das reações pozolânicas levarem tempo para se realizarem.

Em seguida, tentou-se correlacionar o consumo de superplastificante através da regressão múltipla entre o Volume de Superplastificante/Volume de Pasta (Vsuper/Vpasta) e as variáveis Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo e Vcca/Vaglo. A tabela 34 mostra o resumo da estatística demonstrando a validade em se prever o consumo de superplastificante em função das mesmas variáveis utilizadas para prever a resistência à compressão e a resistência à penetração de cloretos.

Tabela 34 - Estatística de regressão múltipla da variável Vsuper/Vpasta em função das variáveis Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo de ISAIA (1995)

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Variável dependente: Vsuper/Vpasta						
R múltiplo	0,950341	Todos os traços						
R-Quadrado	0,903148							
R-quadrado ajustado	0,891753							
Erro padrão	0,006293							
Observações	39							

ANOVA					
	GI	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	0,012556	0,003139	79,26263	9,49E-17
Resíduo	34	0,001346	3,96E-05		
Total	38	0,013902			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,11009	0,01121	-9,82004	1,85E-11	-0,13287	-0,0873	-0,13287	-0,0873
Vaglo/Vpasta	0,283213	0,019442	14,56689	3,52E-16	0,243702	0,322724	0,243702	0,322724
Vcim/Vaglo	0,000726	0,006114	0,118792	0,906139	-0,0117	0,013151	-0,0117	0,013151
Vsa/Vaglo	0,048776	0,012735	3,829988	0,000526	0,022895	0,074657	0,022895	0,074657
Vcca/Vaglo	0,063479	0,008884	7,144951	2,93E-08	0,045424	0,081535	0,045424	0,081535

Foi também feita uma regressão acrescentando a variável Volume de Pasta/Volume de Concreto (Vpasta/Vconc) entre as variáveis independentes, o que causou uma pequena melhora, passando o índice de correlação para 0,9587. Logo, verifica-se que o teor de pasta do concreto tem pouca influência na proporção de superplastificante da pasta, desde que o volume de pasta seja suficiente, já que a inclusão da variável teor de pasta influenciou muito pouco no índice de correlação.

Também é importante observar que a variável Vcim/Vaglo mostrou-se, nesta regressão, possuir pouca influência no teor de superplastificante da pasta (valor-P da estatística). Isso pode ser explicado pela dependência da variável Vcim/Vaglo com o volume de cinza volante, quando não há variação nos teores de cinza de casca de arroz ou sílica ativa. Isto é, para um determinado teor de aglomerante (Vaglo/Vpasta = cte.), fixando-se os teores de sílica ativa (Vsa/Vaglo=cte.) e de cinza de casca de arroz (Vcca/Vaglo=cte.), a variação no teor de cimento ($\Delta V_{cim}/V_{aglo}$) implica na variação contrária de mesmo módulo no teor de cinza volante ($\Delta V_{cv}/V_{aglo}$), ou seja, $\Delta V_{cim}/V_{aglo} = - \Delta V_{cv}/V_{aglo}$. Logo, a variável Vcim/Vaglo só vai se mostrar significativa na variação do teor de superplastificante se a cinza volante possuir demanda por superplastificante consideravelmente diferente da apresentada pelo cimento. Como, no presente trabalho, a cinza

volante possui finura parecida com a do cimento, ela demanda teores de superplastificante da mesma ordem de grandeza que o cimento, e isto explica porque a análise estatística apresentou a variável V_{cim}/V_{aglo} como sendo pouco significativa. Em função disso, foi feita ainda uma outra regressão, sem a variável V_{cim}/V_{aglo} , a qual apresentou um índice de correlação de 0,9503, ou seja, praticamente o mesmo valor de quando esta variável estava presente. Mesmo assim, optou-se por considerar a variável importante na regressão, por ser provável que, em certos casos, ao usar-se cinzas volantes de diferentes finuras, esta variável possa tornar-se muito significativa.

Por fim, foi feita uma regressão entre o Volume de Pasta/Volume de Concreto (V_{pasta}/V_{conc}) e a variável Volume de Aglomerante/Volume de Pasta (V_{aglo}/V_{pasta}), quando verificou-se novamente uma correlação excelente. Os valores do resumo da análise estatística são mostrados na tabela 35. Isso não surpreende já que o método usado para as misturas baseou-se na manutenção do teor de argamassa seca em massa, com aumento na relação água/materiais secos (H), quando da diminuição da relação água/aglomerante. Assim todo acréscimo de aglomerante significa um aumento no volume de pasta e da argamassa úmida. Para aumentar a resistência, aumenta-se o volume de aglomerante, e aumenta-se também um pouco da água (um aumento proporcionalmente menor), diminuindo-se os volumes de areia e brita como mostra a tabela 8 do capítulo II.

Tabela 35 – Estatística de regressão linear entre V_{pasta}/V_{conc} e V_{aglo}/V_{pasta} para os dados do trabalho de ISAIA (1995)

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Variável dependente: V_{pasta}/V_{conc} Todos os traços
R múltiplo	0,994882	
R-Quadrado	0,989791	
R-quadrado ajustado	0,989515	
Erro padrão	0,004994	
Observações	39	

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,089477	0,089477	3587,197	1,92E-38
Resíduo	37	0,000923	2,49E-05		
Total	38	0,0904			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,08498	0,007197	-11,8077	4,11E-14	-0,09957	-0,0704	-0,09957	-0,0704
V_{aglo}/V_{pasta}	0,894964	0,014943	59,89321	1,92E-38	0,864687	0,925241	0,864687	0,925241

O resultado obtido nesta última regressão é importante para confirmar a possibilidade de se prever o consumo de superplastificante que terá um concreto, a partir das variáveis V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} e V_{cca}/V_{aglo} . Nas misturas realizadas por ISAIA (1995), o volume de pasta variou entre $279 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ e $418 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ de concreto.

CAPÍTULO VII

PROPOSIÇÃO DE MÉTODO DE DOSAGEM ECONÔMICA DO CAD A PARTIR DE DOSAGEM EXPERIMENTAL ALEATÓRIA E OBSERVAÇÃO DE REQUISITOS DE RESISTÊNCIA E DURABILIDADE AUXILIADO POR COMPUTADOR

7.1 - INTRODUÇÃO

No Capítulo VI verificou-se que existe boa correlação na regressão linear múltipla entre, pelo menos, duas importantes variáveis utilizadas como requisitos mínimos de qualidade de um concreto, a resistência à compressão e o logaritmo da carga passante do ensaio de penetração acelerada de íons cloreto, com as mesmas variáveis independentes que fornecem os teores em volume dos componentes da pasta. Para um concreto com adição conjunta de duas pozolanas, as variáveis usadas seriam o V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{poz1}/V_{aglo} , sendo que a variável V_{poz2}/V_{aglo} não apareceria, pois já estaria contemplada pelas variáveis anteriores. É importante lembrar que sempre há uma variável já implícita, ou seja, o teor de uma das pozolanas. Logo, no caso de querer utilizar somente uma pozolana, a variável V_{poz1}/V_{aglo} passa a ser a variável implícita.

Também verificou-se que a relação volumétrica V_{super}/V_{pasta} num concreto dosado utilizando método de dosagem adaptado do método EPUSP/IPT (HELENE & TERZIAN, 1992), que mantêm constante o teor de argamassa seca em massa do concreto, também se correlaciona muito bem com as variáveis citadas acima. E, ainda, que a variável V_{pasta}/V_{conc} se correlaciona perfeitamente com a variável V_{aglo}/V_{pasta} .

Têm-se daí um conjunto de dados suficiente para poder analisar as várias combinações de misturas e encontrar a que melhor satisfaz um conjunto de especificações, possibilitando, através do uso de um software, escolher a mistura mais econômica.

Apesar do trabalho do capítulo VI ter correlacionado um conjunto grande de misturas que continham sílica ativa com cinza volante e, também, cinza de casca de arroz com cinza volante, num trabalho prático não há necessidade de dosar um conjunto de misturas com os três tipos de pozolanas. Isto significa que o número de misturas necessárias para a obtenção da massa de dados para os estudos, baseado no trabalho de ISAIA (1995), se reduziria de 39 para 21 misturas. A idéia do presente capítulo é obter um método de determinação da combinação mais econômica de um concreto, que possua adição conjunta de uma superpozolana (sílica ativa ou

cinza de casca de arroz) mais uma pozolana de desempenho normal (geralmente cinza volante), de modo a aproveitar a sinergia que esta combinação possa gerar.

7.2 – SEQUÊNCIA LÓGICA DO ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DE UMA MISTURA MAIS ECONÔMICA

A sequência do estudo de dosagem deve partir da escolha dos materiais a serem utilizados e dos requisitos do concreto. Depois parte-se para a dosagem de várias misturas num intervalo de relações água/aglomerante que supõe-se que irá satisfazer as condições de resistência e durabilidade. Sugere-se o número de 21 misturas para um estudo de dosagem que contemple concretos com adição conjunta de duas pozolanas ou 9 misturas quando desejar adicionar somente uma pozolana. Sugere-se também seguir a metodologia de estudo de trabalhabilidade conforme os passos descrito no item 2.6.6.

Após os resultados dos ensaios de resistência à compressão na idade desejada e dos ensaios de penetração acelerada de cloretos a 91 dias de idade, promove-se a determinação por regressão múltipla da equação que correlaciona a resistência à compressão com as variáveis V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{poz1}/V_{aglo} , a equação que correlaciona o $\log Q_{91}$ com as mesmas variáveis, a equação que correlaciona a variável V_{super}/V_{pasta} ainda com essas variáveis e, por fim, a equação que correlaciona a variável V_{pasta}/V_{conc} com a variável V_{aglo}/V_{pasta} . Em seguida deve-se verificar se os índices de correlação são bons o suficiente para validade do estudo.

Com os coeficientes de todas essas equações, o preço por volume específico de todos os materiais (R\$/m³), o intervalo de validade das variáveis V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{poz1}/V_{aglo} e um valor estipulado para cada iteração a ser usada no software, o valor mínimo para a resistência à compressão na idade escolhida e o valor máximo da carga passante no ensaio de permeabilidade acelerada de cloretos, têm-se todos os dados necessários para que o software encontre os valores de V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{poz1}/V_{aglo} , que proporcionem o menor custo.

A seguir é colocado detalhadamente todos os passos da sequência de dosagem e do software:

a) Entra dados:

- Coeficientes K_1 , K_2 , K_3 , e K_4 , da equação de regressão múltipla encontrada para a resistência à compressão:

$$f_{c_{\text{días}}} = K_1 + K_2 \cdot V_{\text{aglo}}/V_{\text{pasta}} + K_3 \cdot V_{\text{cim}}/V_{\text{aglo}} + K_4 \cdot V_{\text{poz1}}/V_{\text{aglo}}$$

$$K_1 = \quad K_2 = \quad K_3 = \quad K_4 =$$

- Coeficientes K_5 , K_6 , K_7 , e K_8 , da equação de regressão múltipla encontrada para o logaritmo da carga passante no ensaio de penetração acelerada de cloretos:

$$\log Q_{91} = K_5 + K_6 \cdot V_{\text{aglo}}/V_{\text{pasta}} + K_7 \cdot V_{\text{cim}}/V_{\text{aglo}} + K_8 \cdot V_{\text{poz1}}/V_{\text{aglo}}$$

$$K_5 = \quad K_6 = \quad K_7 = \quad K_8 =$$

- Coeficientes K_9 , K_{10} , K_{11} , e K_{12} , da equação de regressão múltipla encontrada para a relação $V_{\text{super}}/V_{\text{pasta}}$:

$$V_{\text{super}}/V_{\text{pasta}} = K_9 + K_{10} \cdot V_{\text{aglo}}/V_{\text{pasta}} + K_{11} \cdot V_{\text{cim}}/V_{\text{aglo}} + K_{12} \cdot V_{\text{poz1}}/V_{\text{aglo}}$$

$$K_9 = \quad K_{10} = \quad K_{11} = \quad K_{12} =$$

- Coeficientes K_{13} e K_{14} da equação de regressão linear simples para a relação $V_{\text{pasta}}/V_{\text{conc}}$:

$$V_{\text{pasta}}/V_{\text{conc}} = K_{13} + K_{14} \cdot V_{\text{aglo}}/V_{\text{pasta}}$$

$$K_{13} = \quad K_{14} =$$

- Preço por metro cúbico real (volume específico) do cimento, superplastificante, pozolana 1, pozolana 2, areia, brita.

$$R\$_{\text{cim}}/\text{m}^3 \text{ cim} = \quad R\$_{\text{super}}/\text{m}^3 \text{ super} = \quad R\$_{\text{poz1}}/\text{m}^3 \text{ poz1} =$$

$$R\$_{\text{poz2}}/\text{m}^3 \text{ poz2} = \quad R\$_{\text{areia}}/\text{m}^3 \text{ areia} = \quad R\$_{\text{pedra}}/\text{m}^3 \text{ pedra} =$$

- Requisitos definidos para o concreto:

Resistência **mínima** à compressão a “j” dias de idade em MPa

$$f_{cj} =$$

Carga passante **máxima** em Coulombs de íons cloreto a 91 dias de idade:

$$Q_{90} =$$

- Intervalos de validade das equações encontradas por regressão, ou seja, valores mínimo e máximo, e o valor para iteração do software:

$$V_{aglo}/V_{pasta} \text{ mín} = \quad V_{aglo}/V_{pasta} \text{ máx} = \quad I_1 =$$

$$V_{cim}/V_{aglo} \text{ mín} = \quad V_{cim}/V_{aglo} \text{ máx} = \quad I_2 =$$

$$V_{poz1}/V_{aglo} \text{ mín} = \quad V_{poz1}/V_{aglo} \text{ máx} = \quad I_3 =$$

- Volume constante de argamassa do concreto (se na dosagem tiver sido mantido constante o teor de argamassa seca em massa ao invés de em volume, calcular o valor médio do volume de argamassa. O erro, em torno de 0,5 %, não é significativo)

$$V_{arg}/V_{conc} =$$

- Estipular um valor inicial “exagerado” para o custo da argamassa por metro cúbico de concreto (se desejar que este valor pertença à rotina permanente do programa).

$$R\$arg/m^3 \text{ conc melhor} =$$

Após a entrada dos dados, o programa inicia as rotinas de cálculo, as quais são explicadas através do fluxograma da figura 34. O software completo em Qbasic é detalhado no Anexo C.

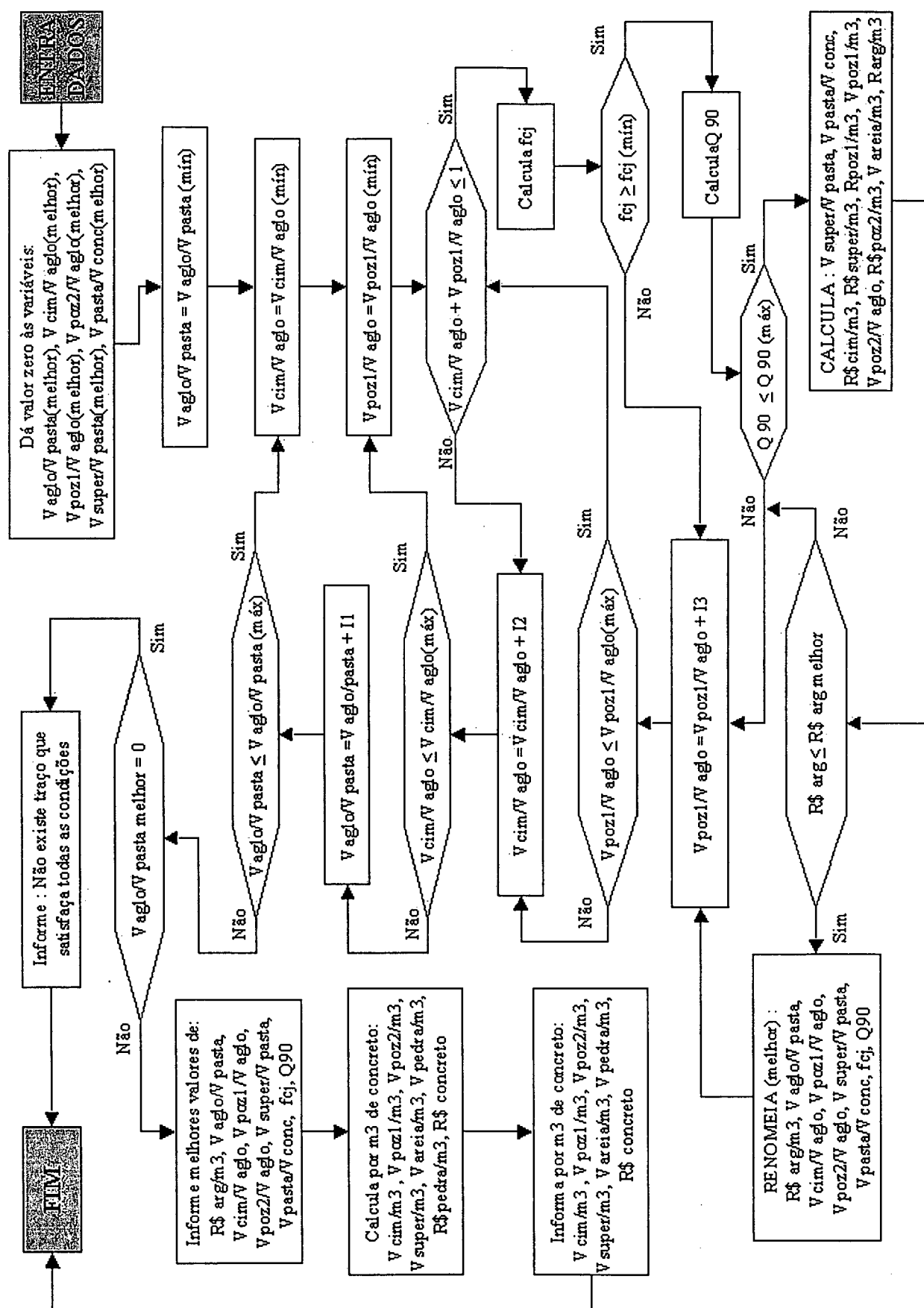


Figura 34 – Fluxograma das rotinas de cálculo do software para determinação da mistura mais econômica para o CAD em função de fcj , $Q91$ e preços dos materiais

7.3 – SIMULAÇÃO DO USO DO SOFTWARE E COMPARAÇÃO COM OS DADOS USADOS PARA OS CÁLCULOS

Para testar o funcionamento do programa e verificar sua capacidade de fornecer de maneira rápida a quantidade de materiais de uma mistura mais econômica, estimada em função de dados de regressões múltiplas previamente efetuadas, fez-se algumas simulações. Para fazer isso, escolheu-se trabalhar com os resultados daquelas misturas efetuadas por ISAIA (1995) que continham só cimento, cimento com sílica ativa, cimento com cinza volante, e cimento com sílica ativa e cinza volante. A idade escolhida foi 28 dias.

A figura 35 mostra a tela com os valores de entrada de dados, sendo o valor de $f_{c28} = 40$ MPa o valor para a primeira simulação. As outras simulações tiveram entradas de dados para f_{c28} de 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 e 85 MPa respectivamente. Em seguida, têm-se os resultados de todas essas simulações e as comparações com os valores das misturas experimentais aleatórias.

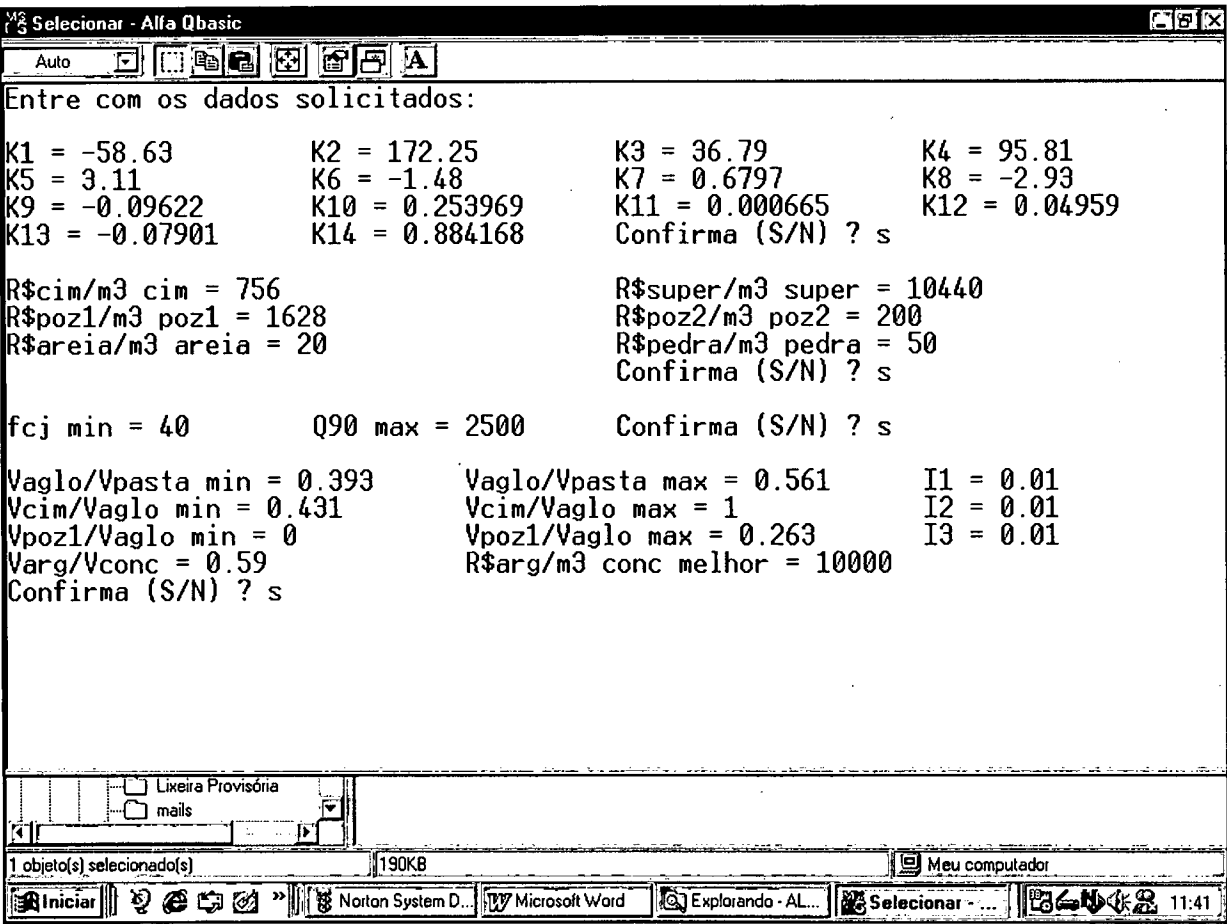


Figura 35 – Tela de entrada de dados do software com os valores usados nas simulações

R\$arg/m3 conc melhor = 88.49638
 Vaglo/Vpasta melhor = .393
 Vcim/Vaglo melhor = .8409996
 Vpoz1/Vaglo melhor = 0
 Vpoz2/Vaglo melhor = .1590004
 Vsuper/Vpasta melhor = 4.149087E-03
 Vpasta/Vconc melhor = .2684681
 fcj melhor = 40.00463
 Q90 melhor = 1258.889
 Vcim/m3 conc = 88.73214
 Vpoz1/m3 conc = 0
 Vpoz2/m3 conc = 16.7758
 Vsuper/m3 conc = 1.113897
 Vaguam3 conc = 161.8462
 Vareia/m3 conc = 321.5319
 Vpedra/m3 conc = 410
 R\$ concreto melhor = 108.9964

R\$arg/m3 conc melhor = 96.97006
 Vaglo/Vpasta melhor = .393
 Vcim/Vaglo melhor = .9809995
 Vpoz1/Vaglo melhor = 0
 Vpoz2/Vaglo melhor = 1.900053E-02
 Vsuper/Vpasta melhor = 4.242187E-03
 Vpasta/Vconc melhor = .2684681
 fcj melhor = 45.15522
 Q90 melhor = 1567.275
 Vcim/m3 conc = 103.5032
 Vpoz1/m3 conc = 0
 Vpoz2/m3 conc = 2.004707
 Vsuper/m3 conc = 1.138892
 Vaguam3 conc = 161.8212
 Vareia/m3 conc = 321.5319
 Vpedra/m3 conc = 410
 R\$ concreto melhor = 117.4701

R\$arg/m3 conc melhor = 115.9057
 Vaglo/Vpasta melhor = .393
 Vcim/Vaglo melhor = .9109995
 Vpoz1/Vaglo melhor = 7.999999E-02
 Vpoz2/Vaglo melhor = 9.000473E-03
 Vsuper/Vpasta melhor = 8.162837E-03
 Vpasta/Vconc melhor = .2684681
 fcj melhor = 50.24472
 Q90 melhor = 818.7782
 Vcim/m3 conc = 96.11769
 Vpoz1/m3 conc = 8.440635
 Vpoz2/m3 conc = .9496214
 Vsuper/m3 conc = 2.191461
 Vaguam3 conc = 160.7686
 Vareia/m3 conc = 321.5319
 Vpedra/m3 conc = 410
 R\$ concreto melhor = 136.4057

R\$arg/m3 conc melhor = 135.9222
 Vaglo/Vpasta melhor = .393
 Vcim/Vaglo melhor = .8109996
 Vpoz1/Vaglo melhor = .17
 Vpoz2/Vaglo melhor = 1.900037E-02
 Vsuper/Vpasta melhor = 1.255944E-02
 Vpasta/Vconc melhor = .2684681
 fcj melhor = 55.18863
 Q90 melhor = 381.5015
 Vcim/m3 conc = 85.5669
 Vpoz1/m3 conc = 17.93635
 Vpoz2/m3 conc = 2.00469
 Vsuper/m3 conc = 3.371808
 Vaguam3 conc = 159.5883
 Vareia/m3 conc = 321.5319
 Vpedra/m3 conc = 410
 R\$ concreto melhor = 156.4222

R\$arg/m3 conc melhor = 154.8579
 Vaglo/Vpasta melhor = .393
 Vcim/Vaglo melhor = .7409997
 Vpoz1/Vaglo melhor = .25
 Vpoz2/Vaglo melhor = 9.000272E-03
 Vsuper/Vpasta melhor = 1.648009E-02
 Vpasta/Vconc melhor = .2684681
 fcj melhor = 60.27813
 Q90 melhor = 199.3046
 Vcim/m3 conc = 78.18136
 Vpoz1/m3 conc = 26.37699
 Vpoz2/m3 conc = .9496002
 Vsuper/m3 conc = 4.424377
 Vaguam3 conc = 158.5357
 Vareia/m3 conc = 321.5319
 Vpedra/m3 conc = 410
 R\$ concreto melhor = 175.3579

R\$arg/m3 conc melhor = 200.318
 Vaglo/Vpasta melhor = .423
 Vcim/Vaglo melhor = .7309997
 Vpoz1/Vaglo melhor = .25
 Vpoz2/Vaglo melhor = 1.900026E-02
 Vsuper/Vpasta melhor = .0240925
 Vpasta/Vconc melhor = .294993
 fcj melhor = 65.07773
 Q90 melhor = 177.1415
 Vcim/m3 conc = 91.21564
 Vpoz1/m3 conc = 31.19552
 Vpoz2/m3 conc = 2.370892
 Vsuper/m3 conc = 7.10712
 Vaguam3 conc = 163.1039
 Vareia/m3 conc = 295.0069
 Vpedra/m3 conc = 410
 R\$ concreto melhor = 220.818

R\$arg/m3 conc melhor = 250.0562
Vaglo/Vpasta melhor = .4529999
Vcim/Vaglo melhor = .7509997
Vpoz1/Vaglo melhor = .24
Vpoz2/Vaglo melhor = 9.000272E-03
Vsuper/Vpasta melhor = 3.122897E-02
Vpasta/Vconc melhor = .3215181
fcj melhor = 70.02293
Q90 melhor = 176.5283
Vcim/m3 conc = 109.3814
Vpoz1/m3 conc = 34.95544
Vpoz2/m3 conc = 1.310869
Vsuper/m3 conc = 10.04068
Vaguam3 conc = 165.8297
Vareia/m3 conc = 268.4819
Vpedra/m3 conc = 410
R\$ concreto melhor = 270.5562

R\$arg/m3 conc melhor = 307.4231
Vaglo/Vpasta melhor = .4829999
Vcim/Vaglo melhor = .7509997
Vpoz1/Vaglo melhor = .24
Vpoz2/Vaglo melhor = 9.000272E-03
Vsuper/Vpasta melhor = 3.884803E-02
Vpasta/Vconc melhor = .3480431
fcj melhor = 75.19041
Q90 melhor = 159.3728
Vcim/m3 conc = 126.2466
Vpoz1/m3 conc = 40.34515
Vpoz2/m3 conc = 1.512989
Vsuper/m3 conc = 13.52079
Vaguam3 conc = 166.4175
Vareia/m3 conc = 241.9569
Vpedra/m3 conc = 410
R\$ concreto melhor = 327.9231

R\$arg/m3 conc melhor = 370.5381
Vaglo/Vpasta melhor = .5129999
Vcim/Vaglo melhor = .7509997
Vpoz1/Vaglo melhor = .24
Vpoz2/Vaglo melhor = 9.000272E-03
Vsuper/Vpasta melhor = 4.646709E-02
Vpasta/Vconc melhor = .3745681
fcj melhor = 80.35791
Q90 melhor = 143.8846
Vcim/m3 conc = 144.3071
Vpoz1/m3 conc = 46.11682
Vpoz2/m3 conc = 1.729433
Vsuper/m3 conc = 17.40509
Vaguam3 conc = 165.0096
Vareia/m3 conc = 215.4319
Vpedra/m3 conc = 410
R\$ concreto melhor = 391.0381

R\$arg/m3 conc melhor = 438.1623
Vaglo/Vpasta melhor = .5429999
Vcim/Vaglo melhor = .7409997
Vpoz1/Vaglo melhor = .24
Vpoz2/Vaglo melhor = 1.900026E-02
Vsuper/Vpasta melhor = 5.407951E-02
Vpasta/Vconc melhor = .4010931
fcj melhor = 85.15751
Q90 melhor = 127.8844
Vcim/m3 conc = 161.3849
Vpoz1/m3 conc = 52.27045
Vpoz2/m3 conc = 4.138134
Vsuper/m3 conc = 21.69092
Vaguam3 conc = 161.6087
Vareia/m3 conc = 188.9068
Vpedra/m3 conc = 410
R\$ concreto melhor = 458.6623

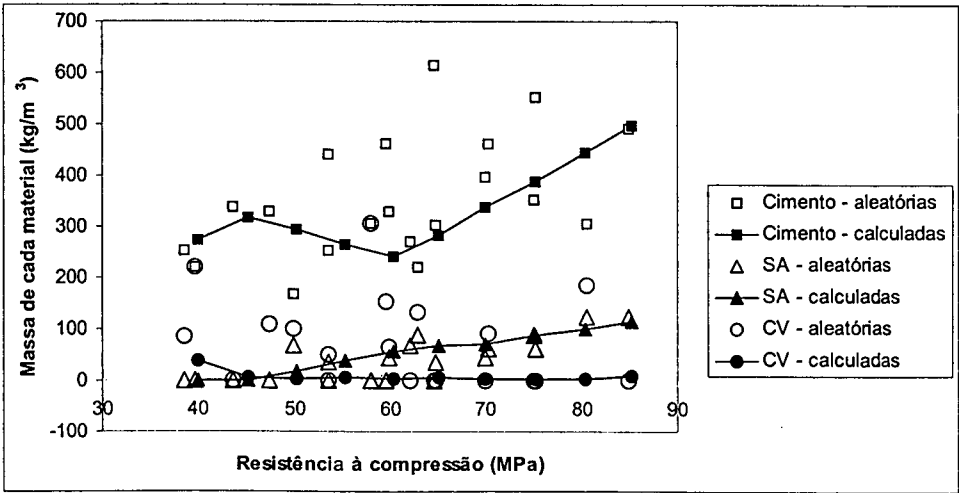


Figura 36 – Consumos de materiais aglomerantes em função da resistência à compressão das misturas aleatórias e das misturas calculadas pelo software para o menor custo

A figura 36 mostra os consumos de cimento, sílica ativa e cinza volante por metro cúbico de concreto, em função da resistência à compressão, das várias misturas aleatórias experimentais cujos valores foram utilizados para obtenção das equações de regressão, e das misturas calculadas pelo software para o menor custo possível para o concreto.

A figura 37 compara os valores da carga passante do ensaio de penetração acelerada de cloretos a 91 dias de idade para as misturas experimentais aleatórias e para as misturas mais econômicas previstas pelo software. Como todas as simulações tiveram como mesmo requisito um valor máximo de $Q_{91} = 2500$ Coulombs, algumas das misturas calculadas possuem valores de carga passante maiores que 1000 Coulombs, mas menores que 2500 Coulombs, pois o software procura pela mistura mais econômica que satisfaça os requisitos iniciais.

A vantagem de se fazer o ensaio de penetração acelerada de cloretos a 91 dias de idade é que o concreto apresenta características de desempenho mais próximas de um concreto maduro. Entretanto, pode-se fazer toda a análise para concretos com 28 dias de idade, mas na análise de regressão da penetração acelerada de cloretos é melhor usar diretamente a carga passante nesta idade (Q_{28}), do que o logaritmo da carga passante, pois em idades menores o índice de correlação na regressão usando a primeira variável é melhor que usando a segunda. É necessário também fazer uma pequena alteração no software que faz o cálculo da carga passante a partir do Q_{91} .

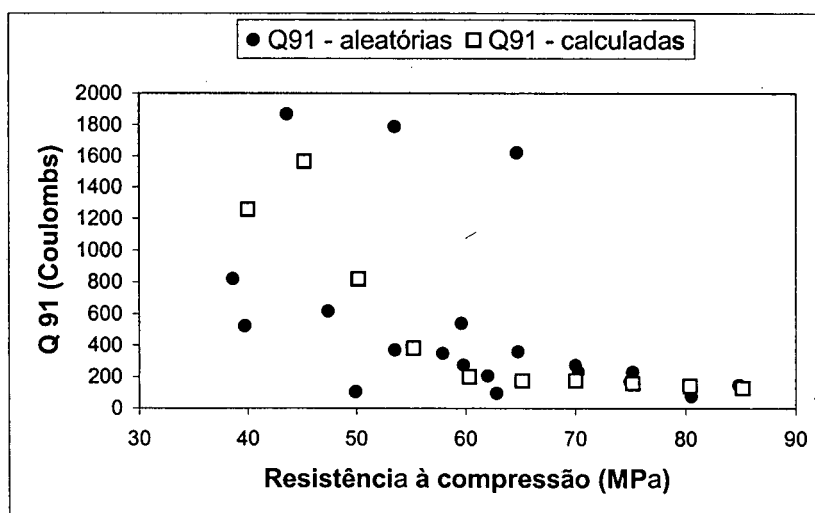


Figura 37 – Valores de Q_{91} dos concretos em função da resistência à compressão, das misturas experimentais aleatórias e das misturas calculadas pelo software para o menor custo

A figura 38 mostra o consumo de superplastificante em função da resistência à compressão dos concretos das misturas experimentais aleatórias e das misturas calculadas pelo

software para concretos de menor custo. Percebe-se que o software consegue encontrar soluções econômicas entre as várias possibilidades de misturas dos materiais para vários valores de resistência à compressão.

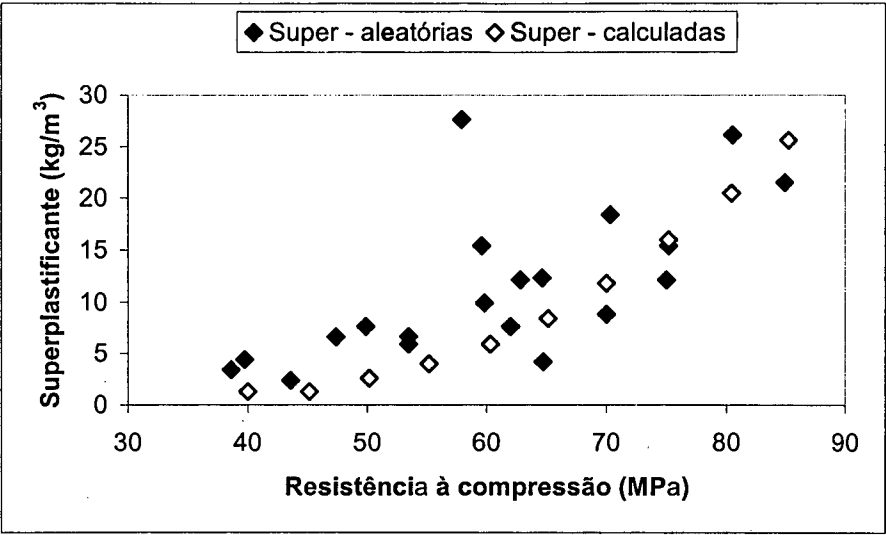


Figura 38 – Consumos de superplastificante em função da resistência à compressão

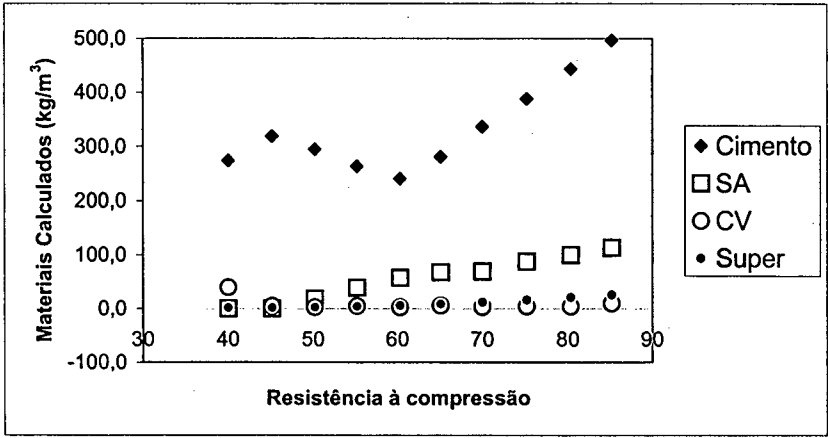


Figura 39 – Consumos de cimento, sílica ativa, cinza volante e superplastificante previstos pelo software para a produção de concretos de menores custos

A figura 39 mostra os consumos de cimento, sílica ativa, cinza volante e superplastificante previstos pelo software para concretos de menor custo, em função da resistência à compressão pretendida. É interessante perceber a lógica induzida no software para projetar as misturas mais econômicas. A partir das resistências mais baixas, adiciona-se sílica ativa e diminui-se o teor de cimento para aumentos na resistência à compressão. Após a

resistência de 60 MPa volta-se a ter necessidade de crescimento no consumo de cimento. Os teores de cinza volante são quase sempre insignificantes e, apesar de possuir custo muito baixo, sua presença parece servir somente para melhorar a distribuição micro-granulométrica. A figura 40 mostra que só há consumo significativo de cinza volante para a mistura de resistência à compressão de 40 MPa.

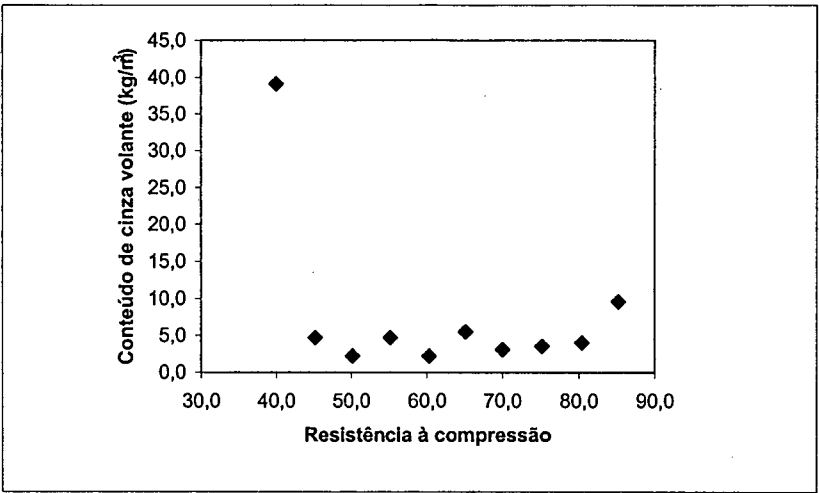


Figura 40 – Consumos calculados de cinza volante em função da resistência à compressão para produção de concretos de menores custos

Por fim, a figura 41 mostra o custo das misturas calculadas pelo software, para cada resistência à compressão, em comparação com as misturas usadas para encontrar os parâmetros usados pelo software. Vê-se que o programa consegue cumprir seu objetivo de encontrar uma mistura econômica, a partir de um conjunto de dados obtidos em laboratório, facilitando o trabalho do tecnologista de concreto.

Observa-se que quatro das misturas experimentais aleatórias usadas para os cálculos parecem ser um pouco mais econômicas do que o software conseguiu encontrar. Entretanto, como a natureza segue sempre uma lógica estatística, e é isso que se procurou com este trabalho ao encontrar uma lógica que explique as propriedades do concreto, pode ser que essas misturas pareçam mais resistentes do que são, ou seja, seriam valores que pertencem ao erro estatístico da fabricação das misturas e dos ensaios de resistência à compressão efetuados.

Outra hipótese seria que essas quatro misturas tenham se mostrado mais econômicas apenas por terem sido dosadas com menos superplastificante do que deveriam ter para que apresentassem a mesma trabalhabilidade que a média das misturas, que é o valor que o software utiliza. No trabalho de laboratório, isso pode não ter sido detectado pelo ensaio de abatimento do

tronco de cone, ou prejudicado o adensamento desses concretos, mas pode haver prejuízos para a resistência mecânica, caso esse problema aconteça, e a mistura seja utilizada em obra.

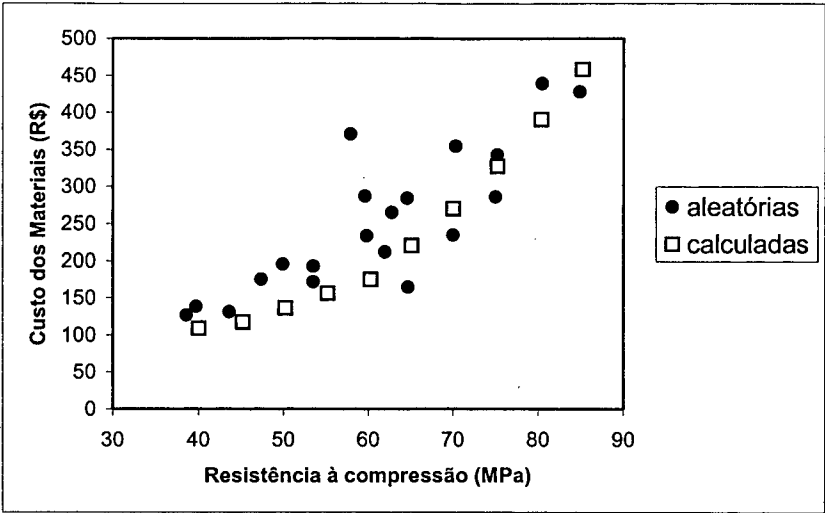


Figura 41 – Custos calculados pelo software de todos os materiais por metro cúbico de concreto e os custos das misturas feitas para o estudo de dosagem

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES, SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 – CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se, inspirado na filosofia do trabalho de ABRAMS (1918), encontrar um meio de prever a resistência à compressão do concreto de alto desempenho em função das quantidades de materiais presentes na pasta do concreto. Procurou-se trabalhar com um número limitado de dados, ao alcance do pesquisador, e de simplificar o processo de análise estatística. A intuição foi muito importante para a escolha das possíveis variáveis que seriam trabalhadas. Algumas tentativas resultaram melhores que outras e possibilitaram a continuidade dos estudos de forma a se chegar a um número limitado de variáveis que pudesse resultar em bons índices de correlação em regressões lineares.

A opção foi a de simplicidade e praticidade que possibilitasse resultados satisfatórios. Espera-se que, no futuro, consiga-se explicar melhor as variações das propriedades estudadas em função das variações dos teores de materiais. É pouco provável que o fenômeno que rege a variação da resistência à compressão em função da variação dos volumes de materiais seja totalmente linear como feito neste trabalho. Entretanto, para a faixa de resistências estudadas, isso se mostrou bastante satisfatório e pode ser aplicado na prática.

No caso da resistência à penetração de cloretos, esta variável só se mostrou com muito boa correlação em idades mais avançadas quando esta foi logaritmada. Porém, em idades menores, os índices de correlação são melhores quando a variável é linear. Outras variáveis dependentes, como o módulo de elasticidade, retração ou penetração de água, que também poderiam ter sido estudadas em função das quantidades de materiais utilizados nas misturas, pois havia disponibilidade de dados no trabalho de ISAIA (1995), só não o foram por absoluta falta de tempo. Espera-se que essas outras variáveis também possam ser correlacionadas com as quantidades de materiais da pasta e sejam obtidos bons índices de correlação na regressão, como os verificados para a resistência à compressão e a resistência à penetração de cloretos.

De qualquer modo é possível concluir que as variáveis dependentes resistência à compressão e resistência à penetração de cloretos, podem correlacionar-se bem na regressão linear múltipla com as variáveis independentes representativas das quantidades, em volume, dos materiais da pasta, dado um conjunto de materiais, confirmando as hipóteses inicialmente formuladas. Isso possibilita a utilização da metodologia de dosagem do concreto de alto

desempenho aqui proposta, visando a obtenção de misturas mais econômicas, com menor esforço que com outras metodologias anteriormente descritas.

Quanto à cinza de casca de arroz, conclui-se que é possível obtê-la com reduzidos teores de carbono, produzindo-a com cor branca a partir da casca crua, ou com tom cinza a partir da mistura de cinzas provenientes de leito fluidizado com casca crua, pelo método inicialmente proposto de realização de pirólise seguida de combustão em leito fixo, confirmando as hipóteses formuladas. O método é simples e econômico, produzindo cinzas com baixos teores de carbono e a sílica permanecendo essencialmente vítrea. Desse modo, se convenientemente moídas, resultam em excelentes pozolanas.

8.2 – SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Uma sugestão que surge naturalmente é a verificação da eficiência da metodologia aqui proposta para dosagem de concretos de alto desempenho econômicos, utilizando materiais de outras regiões e outros fabricantes. Também o de procurar correlacionar outras propriedades do concreto fresco e endurecido com as variáveis aqui utilizadas para representar os volumes de materiais das misturas. Isso pode contribuir com a busca por um método universal para o estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland.

A obtenção de cinza de casca de arroz pelo método aqui descrito pode servir para vários outros trabalhos que se fazem necessários. A começar pela possibilidade de aproveitamento do calor produzido durante as etapas de queima e pirólise da casca de arroz. Uma possibilidade poderia ser a passagem de tubos de menor diâmetro, dentro dos tubos de injeção de ar horizontais que são distribuídos pela fornalha, com o objetivo de produzir água quente ou vapor. Isso deve possibilitar, além do aproveitamento do calor, a aceleração do processo de queima, devido à maior taxa de injeção de ar, sem que isso implique em maior temperatura no leito.

Outra proposta a ser considerada é o estudo do aproveitamento dos gases de pirólise através da catálise desses gases para produção de um combustível líquido, ou mesmo o estudo da combustão desses gases numa outra câmara para aproveitamento da energia e minimização da poluição do ar. Novas configurações para o processo podem ser propostas para sua otimização e adoção pela indústria. Uma idéia interessante que deveria ser estudada é a transformação dos silos de deposição das cinzas de leito fluidizado em fornalhas de combustão em leito fixo. Dessa forma, as cinzas que saem da queima em leito fluidizado, ainda quentes e com grande conteúdo de carbono, poderiam continuar sua queima em leito fixo sem a necessidade de mistura com casca crua, resultando na produção de cinzas de cor cinza com um mínimo de investimento.

Neste trabalho os ensaios de perda ao fogo feitos para a cinza de casca de arroz branca revelaram teores elevados e inesperados de material volatizado durante este ensaio. Como eram cinzas brancas, e com base nas descrições feitas por HOUSTON (1972), sugere-se que se trata de água presente na estrutura do vidro de sílica. No entanto, seria interessante confirmar esta hipótese, que aqui neste trabalho não foi realizado da ausência de equipamento no LABMAT (Laboratório de Ciência dos Materiais) capaz de revelar a água na estrutura do vidro de sílica ou de detectar e quantificar teores de carbono.

Quanto ao desempenho da cinza de casca de arroz no concreto, este vai depender acima de tudo do grau de moagem da cinza. Como a moagem tende a ter custos significativos, há grande necessidade de estudos focados na otimização da moagem da cinza de casca de arroz. Logo, há necessidade de se estudar a moagem em diferentes tipos e tamanhos de moinhos, analisar custos e de definir parâmetros para o controle de qualidade, de forma que esses procedimentos possam ser adotados futuramente para produção comercial de cinzas de casca de arroz de alto desempenho para uso em concretos e argamassas.

8.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O concreto de cimento Portland, como o conhecemos hoje, tem uma história centenária, mas quando começou a ser usado, a dosagem era feita de maneira empírico-intuitiva, pois pouco se sabia sobre as variáveis que influenciam nas suas propriedades e muito menos como elas se relacionam. Foi ABRAMS (1918) quem, pela primeira vez, conseguiu formular uma teoria que possibilitou a dosagem racional do concreto, pois explicava a resistência à compressão como função da relação água/cimento. Somente muito mais tarde, POWERS (1968) permitiu um maior entendimento do fenômeno ao explicar a resistência à compressão como resultado da porosidade da pasta. Entretanto, pela simplicidade e praticidade da Lei de Abrams, é ela ainda hoje a principal ferramenta usada num estudo de dosagem de concreto convencional para auxiliar a procura pela proporção que atenda aquela resistência mecânica especificada em projeto.

São muitas as metodologias de dosagem do concreto convencional disponíveis ao estudioso de concreto de hoje que, de uma forma ou de outra, baseiam-se, entre outros princípios, na Lei de Abrams. Em todos os métodos de dosagem, a parte mais trabalhosa tende a ser o estudo de trabalhabilidade das misturas frescas, pois há um conflito natural entre a plasticidade da mistura fresca de concreto e a resistência mecânica do material no estado endurecido. O fato de ainda não haver um consenso sobre como os conteúdos de pasta e de argamassa, a reologia da mistura fresca, e a distribuição granulométrica e microgranulométrica

afetam as outras várias propriedades do concreto endurecido, faz com que a estratégia usada para o estudo de trabalhabilidade seja diferente nos vários métodos de dosagem.

À primeira vista, a escolha por um ou outro método parece como uma escolha entre um ou outro caminho que se destinam a um mesmo lugar. Mas isso não é totalmente verdadeiro. Os princípios fundamentais utilizados pelos diferentes métodos para o estudo de trabalhabilidade afetam muito a composição das misturas, em especial os teores de pasta, de argamassa e a distribuição granulométrica. Mesmo tendo-se a impressão de que, com um diferente método se encontra um mesmo concreto, por ter-se encontrado uma mesma resistência, as diferenças na composição afetarão outras propriedades que geralmente não são controladas num concreto convencional.

No concreto de alto desempenho essa questão é ainda mais importante. Em princípio, no estudo de dosagem desse material deveríamos estudar todas as propriedades da mistura encontrada, e isso garantiria que o traço encontrado realmente satisfaria todas as necessidades da estrutura. Porém isso é muito difícil e dispendioso. O ideal seria que a ciência pudesse nos dar condições de avaliar todas as propriedades em função de um número mais reduzido de variáveis, e é isso que deve ser buscado. Ainda há muito o que ser resolvido para que se possa dizer que enfim está criado um método definitivo de estudo de dosagem do concreto.

O concreto de alto desempenho é uma evolução do concreto convencional. Aditivos químicos plastificantes de alta eficiência foram lançados no mercado na década de 80, o que possibilitou que começassem a ser produzidos concretos com teores de água muito inferiores aos usados anteriormente, possibilitando fabricar concretos com menores relações água/cimento e, conseqüentemente, com muito maiores resistências. A busca por maiores resistências mecânicas, e o uso de pozolanas, acabaram por trazer ainda maior durabilidade ao material. Entretanto, como o número de componentes adicionados em uma mistura para concreto de alto desempenho é muito maior, o número de variáveis a serem controladas também é muito maior, e as regras criadas para dosagem do concreto convencional não são mais válidas.

Apesar de já existirem muitos métodos para dosagem do concreto de alto desempenho, se for feito um paralelo com o concreto convencional, todos esses métodos parecem estar ainda na era pré-Abrams. Não há ainda uma teoria estruturada que explique matematicamente, dado um conjunto de materiais, as propriedades do concreto em função da sua composição. A falta de uma teoria para dosagem racional, se não impede o uso bem sucedido do material, também não contribui para a sua maior disseminação.

No presente trabalho foi mostrado como os diversos métodos de dosagem do concreto de alto desempenho fixam algumas variáveis para encontrar os valores de outras. DE LARRARD

(1990) faz a opção por conservar o teor de pasta de todos os concretos e tentar produzir uma mesma reologia variando teores de pozolana e superplastificante. MEHTA & AİTCIN (1990) também fixam o teor de pasta em massa mas, para um pré-determinado teor de substituição de cimento por pozolana, controla a trabalhabilidade somente variando os teores de superplastificante. ISAIA (1995), com base em HELENE & TERZIAN (1992), opta por manter constante o teor de argamassa seca do concreto. Por mais que essas diferenças pareçam pequenas, sutis variações podem significar grandes alterações em propriedades nem sempre investigadas. Por isso, o estudo de temas relacionados com a trabalhabilidade das misturas frescas do concreto, e a relação com as propriedades do concreto endurecido, é crucial para o aperfeiçoamento da tecnologia do concreto convencional, e imprescindível para o pleno sucesso do concreto de alto desempenho.

Como o concreto de alto desempenho é um material novo, existem questões ainda mais urgentes a serem resolvidas, pois, como foi dito anteriormente, não se tem ainda sequer uma teoria que explique a resistência à compressão em função das quantidades de materiais da mistura que possa ser usada com facilidade e segurança para o estudo de dosagem. É claro que um material que possui um número maior de componentes adicionados, e do qual exige-se a boa performance em várias outras propriedades, é muito mais difícil de ser estudado. Muita investigação ainda terá que ser feita até que uma teoria satisfatória resolva as questões mais relevantes. ABRAMS (1918), para formular sua teoria e resolver a questão da resistência à compressão, usou dados de 50.000 corpos de prova. Um número desses, sem dúvida, é convincente!

Anexo A

Tabela A.1 - Valores calculados para as variáveis Volume de Aglomerante/Volume da Pasta (V_{aglo}/V_{pasta}), Volume de Cimento/Volume de Aglomerante (V_{cim}/V_{aglo}), Volume de Sílica Ativa/Volume de Aglomerante (V_{sa}/V_{aglo}), Volume de Cinza de Casca de Arroz/Volume de Aglomerante (V_{cca}/V_{aglo}), Volume de Pasta (V_{pasta}) e Volume de Superplastificante/Volume de Pasta (V_{super}/V_{pasta})

Tabela A.2 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 1 dia com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} , V_{cca}/V_{aglo} para concretos com até 35 % de Pozolana

Tabela A.3 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 3 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} , V_{cca}/V_{aglo} para concretos com até 35 % de Pozolana

Tabela A.4 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 28 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} , V_{cca}/V_{aglo} para concretos com até 35 % de Pozolana

Tabela A.5 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 63 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} , V_{cca}/V_{aglo} para concretos com até 35 % de Pozolana

Tabela A.6 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 1 dia com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} , V_{cca}/V_{aglo} para concretos com até 21 % de Pozolana

Tabela A.7 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 3 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} , V_{cca}/V_{aglo} para concretos com até 21 % de Pozolana

Tabela A.8 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 28 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} , V_{cca}/V_{aglo} para concretos com até 21 % de Pozolana

Tabela A.9 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 63 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} , V_{cca}/V_{aglo} para concretos com até 21 % de Pozolana

Tabela A.1 - Valores calculados para as variáveis Volume de Aglomerante/Volume da Pasta (V_{aglo}/V_{pasta}), Volume de Cimento/Volume de Aglomerante (V_{cim}/V_{aglo}), Volume de Sílica Ativa/Volume de Aglomerante (V_{sa}/V_{aglo}), Volume de Cinza de Casca de Arroz/Volume de Aglomerante (V_{cca}/V_{aglo}), Volume de Pasta (V_{pasta}) e Volume de Superplastificante/Volume de Pasta (V_{super}/V_{pasta})

Código	V_{aglo}/V_{pasta}	V_{cim}/V_{aglo}	V_{sa}/V_{aglo}	V_{cca}/V_{aglo}	V_{pasta}	V_{super}/V_{pasta}
C	0,4645	1,0000	0,0000	0,0000	6,8996	0,0344
7S	0,4692	0,9300	0,0700	0,0000	6,8310	0,0227
14S	0,4614	0,8599	0,1401	0,0000	6,9471	0,0423
21S	0,4661	0,7900	0,2100	0,0000	6,8764	0,0305
35S	0,4613	0,6500	0,3500	0,0000	6,9465	0,0423
7A	0,4614	0,9301	0,0000	0,0699	6,9471	0,0423
14A	0,4677	0,8600	0,0000	0,1400	6,8516	0,0263
21A	0,4614	0,7900	0,0000	0,2100	6,9468	0,0423
35A	0,4373	0,6500	0,0000	0,3500	7,3294	0,0535
1S6V	0,4666	0,9300	0,0100	0,0000	6,8681	0,0291
2S12V	0,4658	0,8599	0,0200	0,0000	6,8809	0,0312
3S18V	0,4680	0,7900	0,0301	0,0000	6,8477	0,0256
5S30V	0,4700	0,6500	0,0500	0,0000	6,8186	0,0206
3A4V	0,4614	0,9300	0,0000	0,0300	6,9468	0,0423
6A8V	0,4613	0,8601	0,0000	0,0600	6,9463	0,0423
9A12V	0,4614	0,7900	0,0000	0,0900	6,9468	0,0423
15A20V	0,4613	0,6500	0,0000	0,1500	6,9464	0,0423
14V	0,4663	0,8601	0,0000	0,0000	6,8719	0,0298

Tabela A.2 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 1 dia com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo para concretos com até 35 % de Pozolana

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão								
R múltiplo	0,924433	Idade 1 dia						
R-Quadrado	0,854576	Pozolana = até 35 %						
R-quadrado ajustado	0,80983							
Erro padrão	2,103396							
Observações	18							

ANOVA								
	gi	SQ	MQ	F	F de significação			
Regressão	4	337,9872	84,4968	19,09846	2,36E-05			
Resíduo	13	57,51556	4,424274					
Total	17	395,5028						

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-178,296	59,90278	-2,97643	0,010714	-307,708	-48,8842	-307,708	-48,8842
Vaglo/Vpasta	327,8567	125,55	2,611364	0,021536	56,6225	599,0909	56,6225	599,0909
Vcim/Vaglo	53,73286	6,284873	8,549555	1,07E-06	40,15522	67,3105	40,15522	67,3105
Vsa/Vaglo	46,70739	7,528761	6,203861	3,2E-05	30,44249	62,97229	30,44249	62,97229
Vcca/Vaglo	56,68666	11,24862	5,039432	0,000227	32,38549	80,98782	32,38549	80,98782

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc1 valor mais alto	Resíduos	Resíduos padrão
1	27,72563	0,974372	0,529732
2	28,76215	-0,06215	-0,03379
3	25,71829	3,581714	1,947254
4	26,75994	0,040064	0,021782
5	24,22925	-1,72925	-0,94014
6	26,90889	1,191107	0,647564
7	29,20221	-1,10221	-0,59923
8	27,31576	1,384239	0,752563
9	19,83032	0,769677	0,418447
10	25,12729	1,072715	0,583198
11	21,56201	0,937987	0,509951
12	19,00457	-0,90457	-0,49178
13	13,05917	1,940825	1,05516
14	24,63494	-2,13494	-1,16069
15	22,5642	-3,8642	-2,10083
16	20,5112	-3,0112	-1,63709
17	16,38181	0,518185	0,281719
18	20,80236	0,397642	0,216184

Tabela A.3 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 3 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo para concretos com até 35 % de Pozolana

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		
R múltiplo	0,895308	Idade 3 dias Pozolana = até 35 %
R-Quadrado	0,801576	
R-quadrado ajustado	0,740523	
Erro padrão	2,385186	
Observações	18	

ANOVA

	gi	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	298,771	74,69275	13,12908	0,000169
Resíduo	13	73,95843	5,68911		
Total	17	372,7294			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-84,6619	67,92789	-1,24635	0,234628	-231,411	62,08738	-231,411	62,08738
Vaglo/Vpasta	176,3999	142,3698	1,239027	0,23724	-131,171	483,9711	-131,171	483,9711
Vcim/Vaglo	47,90196	7,12685	6,721336	1,42E-05	32,50534	63,29858	32,50534	63,29858
Vsa/Vaglo	42,87915	8,537382	5,022518	0,000233	24,43526	61,32304	24,43526	61,32304
Vcca/Vaglo	61,69921	12,75559	4,837034	0,000325	34,14245	89,25597	34,14245	89,25597

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc3 valor mais alto	Resíduos	Resíduos padrão
1	45,17762	0,422385	0,202507
2	45,64832	3,051681	1,463086
3	43,92346	2,276545	1,091457
4	44,39707	3,002934	1,439715
5	42,86147	-3,56147	-1,7075
6	45,59162	0,608377	0,291678
7	47,68097	-3,38097	-1,62096
8	47,52117	1,17883	0,565174
9	45,20262	0,997375	0,478177
10	42,62865	0,471354	0,225984
11	39,55678	0,343223	0,164554
12	37,02981	-0,22981	-0,11018
13	31,5261	1,573901	0,754585
14	43,12254	-1,92254	-0,92174
15	41,61437	-1,71437	-0,82193
16	40,11483	-2,71483	-1,30159
17	37,10674	1,593257	0,763865
18	38,79586	-1,99586	-0,95689

Tabela A.4 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 28 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo para concretos com até 35 % de Pozolana

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,968745
R-Quadrado	0,938467
R-quadrado ajustado	0,919533
Erro padrão	2,730415
Observações	18

Idade 28 dias
Pozolana = até 35 %

ANOVA

	gi	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	1478,114	369,5285	49,56679	9,56E-08
Resíduo	13	96,91713	7,455164		
Total	17	1575,031			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-287,895	77,7597	-3,70236	0,002658	-455,884	-119,905	-455,884	-119,905
Vaglo/Vpasta	615,6699	162,9762	3,777668	0,002303	263,5813	967,7586	263,5813	967,7586
Vcim/Vaglo	60,32771	8,158383	7,394568	5,24E-06	42,7026	77,95282	42,7026	77,95282
Vsa/Vaglo	136,5404	9,773073	13,97108	3,31E-09	115,4269	157,6538	115,4269	157,6538
Vcca/Vaglo	110,6855	14,60182	7,580257	4,01E-06	79,14021	142,2308	79,14021	142,2308

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc28 valor mais alto	Resíduos	Resíduos padrão
1	58,41092	-1,01092	-0,42339
2	66,61502	2,684981	1,124515
3	67,16786	5,832136	2,442597
4	75,37089	0,729109	0,305363
5	83,13498	-3,23498	-1,35486
6	60,00987	1,090128	0,456564
7	67,45646	-1,35646	-0,56811
8	67,05302	-0,95302	-0,39914
9	59,26919	0,03081	0,012904
10	56,85979	1,84021	0,770711
11	53,49837	-1,09837	-0,46002
12	52,02404	-2,72404	-1,14087
13	47,50984	1,190158	0,498458
14	55,57498	-3,77498	-1,58102
15	54,6487	-0,3487	-0,14604
16	53,7666	-0,0666	-0,02789
17	51,94337	2,95663	1,238287
18	51,08611	-1,78611	-0,74805

Tabela A.5 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 63 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo para concretos com até 35 % de Pozolana

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		
R múltiplo	0,913716	Idade 63 dias Pozolana = até 35 %
R-Quadrado	0,834878	
R-quadrado ajustado	0,784071	
Erro padrão	4,261598	
Observações	18	

ANOVA

	gi	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	1193,729	298,4322	16,43239	5,29E-05
Resíduo	13	236,0958	18,16121		
Total	17	1429,824			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-238,417	121,3664	-1,96444	0,071223	-500,613	23,77872	-500,613	23,77872
Vaglo/Vpasta	558,8676	254,3713	2,197055	0,04675	9,331992	1108,403	9,331992	1108,403
Vcim/Vaglo	41,13682	12,7335	3,230597	0,006569	13,62776	68,64587	13,62776	68,64587
Vsa/Vaglo	120,0773	15,25369	7,872017	2,67E-06	87,12374	153,0309	87,12374	153,0309
Vcca/Vaglo	88,53348	22,79033	3,884694	0,00188	39,29797	137,769	39,29797	137,769

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc63 valor mais alto	Resíduos	Resíduos padrão
1	62,31273	-0,51273	-0,13758
2	70,44299	5,65701	1,517984
3	71,62912	6,970882	1,870545
4	79,75723	2,642769	0,709152
5	88,17126	-5,77126	-1,54864
6	63,88196	-0,28196	-0,07566
7	70,75958	-0,25958	-0,06966
8	70,5114	-3,1114	-0,8349
9	63,68158	2,418424	0,648952
10	61,81929	2,48071	0,665666
11	59,68446	-2,28446	-0,613
12	59,26073	-3,06073	-0,82131
13	56,99302	4,106981	1,102055
14	60,33357	-2,93357	-0,78718
15	60,0878	-1,3878	-0,3724
16	59,8841	-5,5841	-1,49842
17	59,41945	3,580545	0,960792
18	57,56975	-2,66975	-0,71639

Tabela A.6 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 1 dia com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo para concretos com até 21 % de Pozolana

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		
R múltiplo	0,921328	Idade 1 dia Pozolana = até 21 %
R-Quadrado	0,848845	
R-quadrado ajustado	0,781665	
Erro padrão	2,058223	
Observações	14	

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	214,1085	53,52711	12,6354	0,000978
Resíduo	9	38,12654	4,236283		
Total	13	252,235			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-206,952	98,23743	-2,10665	0,06442	-429,18	15,27711	-429,18	15,27711
Vaglo/Vpasta	364,6882	207,9765	1,753507	0,113416	-105,788	835,1642	-105,788	835,1642
Vcim/Vaglo	65,9569	10,5828	6,232462	0,000153	42,01692	89,89688	42,01692	89,89688
Vsa/Vaglo	62,82238	11,01211	5,704845	0,000293	37,91124	87,73352	37,91124	87,73352
Vcca/Vaglo	62,61294	11,83157	5,292021	0,000499	35,84804	89,37784	35,84804	89,37784

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc1 valor mais alto	Resíduos	Resíduos padrão
1	28,40254	0,297455	0,173692
2	29,88309	-1,18309	-0,69084
3	26,82543	2,474568	1,444965
4	28,31112	-1,51112	-0,88238
5	27,03059	1,069407	0,624455
6	29,11698	-1,01698	-0,59384
7	26,5542	2,145798	1,252988
8	25,18826	1,011742	0,590783
9	20,89754	1,602459	0,935718
10	17,72875	0,371253	0,216785
11	24,51817	-2,01817	-1,17846
12	21,76916	-3,06916	-1,79216
13	19,03825	-1,53825	-0,89823
14	19,83591	1,364093	0,796529

Tabela A.7 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 3 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo para concretos com até 21 % de Pozolana

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Idade 3 dias Pozolana = até 21 %
R múltiplo	0,950359	
R-Quadrado	0,903182	
R-quadrado ajustado	0,860152	
Erro padrão	1,620062	
Observações	14	

ANOVA

	gi	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	220,3557	55,08894	20,98946	0,000138
Resíduo	9	23,6214	2,6246		
Total	13	243,9771			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%
Interseção	-115,215	77,32431	-1,49002	0,170404	-290,135	59,70475	-290,135
Vaglo/Vpasta	218,1558	163,7018	1,332642	0,215402	-152,164	588,4753	-152,164
Vcim/Vaglo	59,37197	8,329898	7,127574	5,5E-05	40,52841	78,21552	40,52841
Vsa/Vaglo	70,04248	8,667815	8,080754	2,04E-05	50,4345	89,65045	50,4345
Vcca/Vaglo	66,50242	9,312829	7,140947	5,42E-05	45,43532	87,56952	45,43532

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc3 valor mais alto	Resíduos	Resíduos padrão
1	45,48993	0,110067	0,081654
2	47,25368	1,446321	1,07296
3	46,30425	-0,10425	-0,07734
4	48,06957	-0,66957	-0,49672
5	45,30756	0,892445	0,662064
6	47,19546	-2,89546	-2,14801
7	46,30203	2,397974	1,778948
8	42,49889	0,601111	0,445937
9	38,86111	1,038889	0,770704
10	35,89728	0,902718	0,669686
11	42,64472	-1,44472	-1,07177
12	40,47721	-0,57721	-0,42821
13	38,31912	-0,91912	-0,68185
14	37,57921	-0,77921	-0,57806

Tabela A.8 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 28 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo para concretos com até 21 % de Pozolana

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		
R múltiplo	0,978131	Idade 28 dias Pozolana = até 21 %
R-Quadrado	0,956741	
R-quadrado ajustado	0,937515	
Erro padrão	2,219405	
Observações	14	

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	980,4682	245,117	49,7623	3,86E-06
Resíduo	9	44,33182	4,925758		
Total	13	1024,8			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%
Interseção	-246,152	105,9305	-2,32371	0,04521	-485,783	-6,52019	-485,783
Vaglo/Vpasta	497,6437	224,2634	2,219015	0,05365	-9,6757	1004,963	-9,6757
Vcim/Vaglo	73,90613	11,41155	6,476431	0,000115	48,09138	99,72087	48,09138
Vsa/Vaglo	164,2747	11,87448	13,83427	2,27E-07	137,4128	191,1367	137,4128
Vcca/Vaglo	116,3551	12,75812	9,120086	7,66E-06	87,49424	145,216	87,49424

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc28 valor mais alto	Resíduos	Resíduos padrão
1	58,90917	-1,50917	-0,81724
2	67,55392	1,746084	0,945538
3	70,01777	2,982234	1,614937
4	78,6582	-2,5582	-1,38531
5	60,32359	0,77641	0,420441
6	66,46491	-0,36491	-0,19761
7	66,26105	-0,16105	-0,08721
8	56,43632	2,263676	1,225824
9	52,49664	-0,09664	-0,05233
10	50,08587	-0,78587	-0,42557
11	55,6645	-3,8645	-2,0927
12	53,96289	0,33711	0,182551
13	52,29397	1,40603	0,761392
14	49,47119	-0,17119	-0,0927

Tabela A.9 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 63 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo, Vcca/Vaglo para concretos com até 21 % de Pozolana

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		
R múltiplo	0,981184	Idade 63 dias
R-Quadrado	0,962722	Pozolana = até 21 %
R-quadrado ajustado	0,946154	
Erro padrão	2,140208	
Observações	14	

ANOVA

	gi	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	1064,63	266,1575	58,10677	1,99E-06
Resíduo	9	41,22441	4,58049		
Total	13	1105,854			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-372,174	102,1505	-3,64339	0,005372	-603,255	-141,094	-603,255	-141,094
Vaglo/Vpasta	775,4681	216,2608	3,5858	0,005877	286,2518	1264,684	286,2518	1264,684
Vcim/Vaglo	76,2136	11,00434	6,925775	6,87E-05	51,32003	101,1072	51,32003	101,1072
Vsa/Vaglo	170,9039	11,45075	14,92512	1,18E-07	145,0005	196,8073	145,0005	196,8073
Vcca/Vaglo	102,2117	12,30286	8,307963	1,63E-05	74,38067	130,0427	74,38067	130,0427

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc63 valor mais alto	Resíduos	Resíduos padrão
1	64,24315	-2,44315	-1,37197
2	74,48541	1,614588	0,906684
3	75,09035	3,509645	1,970869
4	85,33142	-2,93142	-1,64616
5	63,64043	-0,04043	-0,0227
6	70,39693	0,103065	0,057877
7	67,26676	0,133237	0,07482
8	62,26272	2,037285	1,144053
9	58,00209	-0,60209	-0,33811
10	56,11839	0,081611	0,045829
11	59,53739	-2,13739	-1,20027
12	57,24204	1,457963	0,81873
13	54,9976	-0,6976	-0,39174
14	54,98532	-0,08532	-0,04791

Anexo B

REGRESSÕES LINEARES MÚLTIPLAS COM OS DADOS DO TRABALHO DE ISAIA (1995)

TABELA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela B.1 - Resistência à compressão dos concretos produzidos por Isaia nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias

REGRESSÕES COM TODOS OS CONCRETOS (SÍLICA ATIVA E/OU CINZA VOLANTE E/OU CINZA DE CASCA DE ARROZ)

Tabela B.2 - Valores das variáveis Volume de Aglomerante/Volume da Pasta (V_{aglo}/V_{pasta}), Volume de Cimento/Volume de Aglomerante (V_{cim}/V_{aglo}), Volume de Sílica Ativa/Volume de Aglomerante (V_{sa}/V_{aglo}), Volume de Cinza de Casca de Arroz/Volume de Aglomerante (V_{cca}/V_{aglo}), Volume de Pasta por m^3 de Concreto e Volume de Superplastificante por m^3 de Concreto (V_{super}).

Tabela B.3 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 3 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} e V_{cca}/V_{aglo} para os concretos produzidos por Isaia

Tabela B.4 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 7 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} e V_{cca}/V_{aglo} para todos os concretos produzidos por Isaia

Tabela B.5 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 28 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} e V_{cca}/V_{aglo} para todos os concretos produzidos por Isaia

Tabela B.6 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 91 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} , V_{sa}/V_{aglo} e V_{cca}/V_{aglo} para todos os concretos produzidos por Isaia

REGRESSÕES COM CONCRETOS CONTENDO SÍLICA ATIVA E/OU CINZA VOLANTE

Tabela B.7 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 3 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} e V_{sa}/V_{aglo} para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

Tabela B.8 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 7 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} e V_{sa}/V_{aglo} para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

Tabela B.9 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 28 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} e V_{sa}/V_{aglo} para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

Tabela B.10 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 91 dias com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} e V_{sa}/V_{aglo} para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

Tabela B.11 - Estatística de regressão entre Log Q91 com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vsa/Vaglo para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

Tabela B.12 - Estatística de regressão entre Vsuper/Vpasta com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vsa/Vaglo para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

Tabela B.13 - Estatística de regressão entre Vpasta/Vconc com Vaglo/Vpasta para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

REGRESSÕES COM CONCRETOS CONTENDO CINZA DE CASCA DE ARROZ E/OU CINZA VOLANTE

Tabela B.14 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 3 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vcca/Vaglo para os concretos sem SA produzidos por Isaia

Tabela B.15 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 7 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vcca/Vaglo para os concretos sem SA produzidos por Isaia

Tabela B.16 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 28 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vcca/Vaglo para os concretos sem SA produzidos por Isaia

Tabela B.17 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 91 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vcca/Vaglo para os concretos sem SA produzidos por Isaia

Tabela B.18 - Estatística de regressão entre Log Q91 com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vcca/Vaglo para os concretos sem SA produzidos por Isaia

Tabela B.19 - Estatística de regressão entre Vsuper/Vpasta com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vcca/Vaglo para os concretos sem SA produzidos por Isaia

Tabela B.20 - Estatística de regressão entre Vpasta/Vconc com Vaglo/Vpasta para os concretos sem SA produzidos por Isaia

Tabela B.1 - Resistência à compressão dos concretos produzidos por Isaia nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias

Código da Mistura*	Resistência à Compressão do Concreto em MPa na Idade de			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
C/3	57,3	62	64,6	73,3
C/4	43,8	46,1	53,5	58,9
C/5	30,3	35,9	43,6	48,5
S10/3	56,9	61,3	75,2	79,4
S10/4	48,4	55	70	75,6
S10/5	38	45,7	64,7	69,3
S20/3	57,5	68,3	84,9	95
S20/4	42,9	52,7	75	86,1
S20/5	33,6	42,9	62	73,7
S10V15/3	46,8	58,5	70,3	80,7
S10V15/4	36,8	47,2	59,8	74,6
S10V15/5	32,9	41,1	53,5	64,5
S20V30/3	35	51,1	80,5	96,1
S20V30/4	28,3	40,4	62,8	78,7
S20V30/5	25,2	32,9	49,9	68,9
A10/3	54,8	56,4	69,6	76,2
A10/4	44,4	48,7	61,6	67,4
A10/5	34,4	40,6	51,3	55,8
A20/3	50,8	56,6	71	78,9
A20/4	44	48,9	62	70,8
A20/5	36,8	43,3	51,2	58,8
A30/3	58,9	70,9	85,5	99,9
A30/4	46,8	58,5	69,8	81
A30/5	37,2	50,5	61,5	73,2
A10V15/3	48	54,8	72	77,6
A10V15/4	34,5	43,5	57,3	63
A10V15/5	24,6	33,1	44,5	49,5
A20V30/3	40,9	53,8	72,5	86,8
A20V30/4	28,8	37,3	51,2	62
A20V30/5	19,3	25,1	35,9	44,4
A30V20/3	42,1	57,4	73,5	85,5
A30V20/4	30,8	43,9	55,7	69,4
A30V20/5	26	39,1	47,5	63
V25/3	47,3	53,2	59,6	75,4
V25/4	32,6	41,2	47,4	59,8
V25/5	23,3	31,2	38,6	48,8
V50/3	32,9	46,8	57,9	77,3
V50/4	20,8	29,3	39,7	54,3
V50/5	12,6	18,7	28,4	37,8

*As letras C, S, A e V representam respectivamente cimento, sílica ativa e cinza de casca de arroz e cinza volante. Os números após cada uma das letras significa o percentual em massa de substituição de cimento pela pozolana representada. Os números 3, 4 e 5 após a barra “ / ” indicam a relação água/aglomerante em massa da mistura em 0,3 , 0,4 e 0,5 respectivamente.

Tabela B.2 - Valores das variáveis Volume de Aglomerante/Volume da Pasta (Vaglo/Vpasta), Volume de Cimento/Volume de Aglomerante (Vcim/Vaglo), Volume de Sílica Ativa/Volume de Aglomerante (Vsa/Vaglo), Volume de Cinza de Casca de Arroz/Volume de Aglomerante (Vcca/Vaglo), Volume de Pasta por m³ de Concreto e Volume de Superplastificante por m³ de Concreto (Vsuper).

Código da Mistura	Vaglo/Vpasta	Vcim/Vaglo	Vsa/Vaglo	Vcca/Vaglo	Vpasta (dm ³ /m ³)	Vsuper (dm ³ /m ³)
C/3	0,519615	1	0	0	383,65	12,3
C/4	0,448591	1	0	0	318,46	6,6
C/5	0,393137	1	0	0	279,14	2,4
S10/3	0,529659	0,864629	0,135371	0	392,06	15,4
S10/4	0,45849	0,863777	0,136223	0	324,65	8,8
S10/5	0,403321	0,863004	0,136996	0	283,57	4,2
S20/3	0,539438	0,737702	0,262298	0	400,60	21,5
S20/4	0,467877	0,738095	0,261905	0	330,94	12,1
S20/5	0,413767	0,736666	0,263334	0	287,60	7,6
S10V15/3	0,540918	0,688888	0,12938	0	401,67	18,4
S10V15/4	0,469614	0,687935	0,13019	0	331,65	9,9
S10V15/5	0,414548	0,689557	0,131011	0	288,49	5,9
S20V30/3	0,561068	0,42356	0,240865	0	419,43	26,1
S20V30/4	0,489171	0,423572	0,240479	0	344,73	12,1
S20V30/5	0,434521	0,42353	0,241879	0	298,15	7,6
A10/3	0,530781	0,860745	0	0,139255	392,99	18,4
A10/4	0,459474	0,859873	0	0,140127	325,42	9,9
A10/5	0,40456	0,859081	0	0,140919	283,99	5,1
A20/3	0,541466	0,731308	0	0,268692	402,59	24,6
A20/4	0,469759	0,731707	0	0,268293	332,49	14,3
A20/5	0,415456	0,730256	0	0,269744	288,94	5,9
A30/3	0,551622	0,614403	0	0,385597	411,93	30,7
A30/4	0,481175	0,614035	0	0,385965	338,46	17,6
A30/5	0,424533	0,615371	0	0,384629	294,54	8,5
A10V15/3	0,541986	0,68593	0	0,133119	402,61	18,4
A10V15/4	0,470693	0,684963	0	0,133948	332,32	9,9
A10V15/5	0,415606	0,686559	0	0,134789	289,02	5,9
A20V30/3	0,562236	0,420187	0	0,246911	421,92	30,7
A20V30/4	0,491877	0,420203	0	0,246519	345,59	17,6
A20V30/5	0,436203	0,420143	0	0,247942	299,40	6,8
A30V20/3	0,566391	0,415168	0	0,364952	423,88	33,8
A30V20/4	0,494615	0,415152	0	0,365334	347,85	19,8
A30V20/5	0,43809	0,415211	0	0,363945	301,65	8,5
V25/3	0,538701	0,695063	0	0	399,74	15,4
V25/4	0,467803	0,694141	0	0	329,95	6,6
V25/5	0,41164	0,695817	0	0	287,92	3,4
V50/3	0,556287	0,430684	0	0	416,03	27,6
V50/4	0,484586	0,430684	0	0	342,25	4,4
V50/5	0,429105	0,430684	0	0	296,90	2,5

Tabela B.3 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 3 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo e Vcca/Vaglo para todos os concretos produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Idade 3 dias		
R múltiplo	0,972364	SA	CCA	CV
R-Quadrado	0,945492			
R-quadrado ajustado	0,939079			
Erro padrão	2,83803			
Observações	39			

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	4750,186	1187,546	147,4404	5,65E-21
Resíduo	34	273,8502	8,054417		
Total	38	5024,036			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-78,0843	5,055675	-15,4449	6,21E-17	-88,3586	-67,8099	-88,3586	-67,8099
Vaglo/Vpasta	154,9869	8,768048	17,67633	1,04E-18	137,1681	172,8058	137,1681	172,8058
Vcim/Vaglo	53,8131	2,75716	19,51759	4,79E-20	48,20988	59,41632	48,20988	59,41632
Vsa/Vaglo	38,85211	5,743327	6,76474	8,91E-08	27,18028	50,52395	27,18028	50,52395
Vcca/Vaglo	35,83483	4,006714	8,943695	1,88E-10	27,69221	43,97745	27,69221	43,97745

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc3	Resíduos	Observação	Previsto fc3	Resíduos
1	56,26237	1,037629	21	35,26958	1,530416
2	45,25464	-1,45464	22	54,2907	4,609305
3	36,65987	-6,35987	23	43,3657	3,434304
4	55,79378	1,106216	24	34,61091	2,589094
5	44,75081	3,649195	25	47,59881	0,401191
6	36,18869	1,811306	26	36,527	-2,027
7	55,41044	2,089556	27	28,10518	-3,50518
8	44,32534	-1,42534	28	40,51451	0,38549
9	35,9175	-2,3175	29	29,59668	-0,79668
10	47,84881	-1,04881	30	21,01571	-1,71571
11	36,77792	0,022083	31	45,11839	-3,01839
12	28,36246	4,537543	32	34,00697	-3,20697
13	41,02516	-6,02516	33	25,1997	0,800301
14	29,86773	-1,56773	34	42,81083	4,489174
15	21,44975	3,75025	35	31,773	0,827002
16	55,48931	-0,68931	36	23,15863	0,141371
17	44,42206	-0,02206	37	31,30943	1,590571
18	35,89689	-1,49689	38	20,19667	0,603331
19	54,8183	-4,0183	39	11,59786	1,002143
20	43,71193	0,288065			

Tabela B.4 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 7 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo e Vcca/Vaglo para todos os concretos produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,956343
R-Quadrado	0,914593
R-quadrado ajustado	0,904545
Erro padrão	3,546147
Observações	39

Idade 7 dias
SA CCA CV

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	4578,531	1144,633	91,02331	1,13E-17
Resíduo	34	427,5555	12,57516		
Total	38	5006,087			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-69,2185	6,317116	-10,9573	1,07E-12	-82,0564	-56,3806	-82,0564	-56,3806
Vaglo/Vpasta	164,9429	10,95576	15,05535	1,33E-16	142,6781	187,2076	142,6781	187,2076
Vcim/Vaglo	43,78657	3,445099	12,70982	1,8E-14	36,78529	50,78785	36,78529	50,78785
Vsa/Vaglo	52,45675	7,176345	7,309676	1,82E-08	37,87267	67,04083	37,87267	67,04083
Vcca/Vaglo	42,80637	5,006429	8,550279	5,48E-10	32,63209	52,98065	32,63209	52,98065

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc7	Resíduos
1	60,27485	1,725152
2	48,56001	-2,46001
3	39,41313	-3,51313
4	63,10523	-1,80523
5	51,37383	3,626166
6	42,28074	3,419263
7	65,81869	2,481309
8	54,01184	-1,31184
9	45,09905	-2,19905
10	56,95292	1,547081
11	45,1927	2,007296
12	36,22391	4,87609
13	54,50691	-3,40691
14	42,62832	-2,22832
15	33,6857	-0,7857
16	61,98002	-5,58002
17	50,21767	-1,51767
18	41,15924	-0,55924
19	63,61557	-7,01557
20	51,78851	-2,88851

Observação	Previsto fc7	Resíduos
21	42,83019	0,46981
22	65,17624	5,723758
23	53,55613	4,943875
24	44,2147	6,285304
25	55,91109	-1,11109
26	44,14497	-0,64497
27	35,16457	-2,06457
28	52,48618	1,313818
29	40,86497	-3,56497
30	31,74024	-6,64024
31	58,00467	-0,60467
32	46,18149	-2,28149
33	36,80118	2,298822
34	50,07078	3,129225
35	38,33634	2,863656
36	29,14602	2,053982
37	41,39528	5,404723
38	29,56866	-0,26866
39	20,41749	-1,71749

Tabela B.5 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 28 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo e Vcca/Vaglo para todos os concretos produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Idade 28 dias		
R múltiplo	0,962486	SA	CCA	CV
R-Quadrado	0,92638			
R-quadrado ajustado	0,917719			
Erro padrão	3,873362			
Observações	39			

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	6418,731	1604,683	106,958	9,18E-19
Resíduo	34	510,0997	15,00293		
Total	38	6928,831			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-67,0488	6,900017	-9,71719	2,42E-11	-81,0713	-53,0263	-81,0713	-53,0263
Vaglo/Vpasta	185,1481	11,96669	15,47196	5,89E-17	160,8289	209,4674	160,8289	209,4674
Vcim/Vaglo	39,98881	3,762989	10,62687	2,4E-12	32,3415	47,63612	32,3415	47,63612
Vsa/Vaglo	96,55482	7,838529	12,31798	4,35E-14	80,62503	112,4846	80,62503	112,4846
Vcca/Vaglo	52,65622	5,468389	9,629201	3,04E-11	41,54312	63,76931	41,54312	63,76931

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc28	Resíduos	Observação	Previsto fc28	Resíduos
1	69,14579	-4,54579	21	53,27793	-2,07793
2	55,99589	-2,49589	22	79,95637	5,543626
3	45,72854	-2,12854	23	66,91787	2,882129
4	78,66282	-3,46282	24	56,41373	5,086266
5	65,53424	4,465759	25	67,73801	4,261994
6	55,36347	9,336525	26	54,54324	2,756762
7	87,65315	-2,75315	27	44,452	0,048004
8	74,38155	0,618453	28	66,85231	5,647687
9	64,44389	-2,44389	29	53,80556	-2,60556
10	73,14124	-2,84124	30	43,57017	-7,67017
11	59,97964	-0,17964	31	73,63649	-0,13649
12	49,92824	3,571761	32	60,3669	-4,6669
13	77,02626	3,473739	33	49,83057	-2,33057
14	63,67795	-0,87795	34	60,48542	-0,88542
15	53,69296	-3,79296	35	47,32199	0,07801
16	72,97705	-3,37705	36	36,99051	1,60949
17	59,78585	1,814149	37	53,16931	4,730686
18	49,62868	1,671318	38	39,89396	-0,19396
19	76,59501	-5,59501	39	29,62178	-1,22178
20	63,31365	-1,31365			

Tabela B.6 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 91 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo, Vsa/Vaglo e Vcca/Vaglo para todos os concretos produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Idade 91 dias		
R múltiplo	0,945852	SA	CCA	CV
R-Quadrado	0,894635			
R-quadrado ajustado	0,88224			
Erro padrão	4,900965			
Observações	39			

ANOVA

	gi	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	6934,155	1733,539	72,17226	3,94E-16
Resíduo	34	816,6617	24,01946		
Total	38	7750,817			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-51,8478	8,730593	-5,93863	1,03E-06	-69,5905	-34,1051	-69,5905	-34,1051
Vaglo/Vpasta	198,0093	15,14145	13,0773	8,03E-15	167,2382	228,7804	167,2382	228,7804
Vcim/Vaglo	23,55083	4,761311	4,94629	2,02E-05	13,87468	33,22697	13,87468	33,22697
Vsa/Vaglo	102,6288	9,918092	10,34764	4,83E-12	82,47284	122,7848	82,47284	122,7848
Vcca/Vaglo	48,29782	6,919153	6,980308	4,73E-08	34,23642	62,35923	34,23642	62,35923

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc91	Resíduos	Observação	Previsto fc91	Resíduos
1	74,59166	-1,29166	21	60,6426	-1,8426
2	60,52832	-1,62832	22	90,47175	9,428246
3	49,54775	-1,04775	23	76,53166	4,46834
4	87,28534	-7,88534	24	65,2829	7,917104
5	73,26062	2,339376	25	78,05409	-0,45409
6	62,39773	6,902274	26	63,95469	-0,95469
7	99,25882	-4,25882	27	53,12507	-3,62507
8	85,058	1,041996	28	81,30117	5,498835
9	74,45659	-0,75659	29	67,35095	-5,35095
10	84,761	-4,061	30	56,39433	-11,9943
11	70,70293	3,89707	31	87,70681	-2,20681
12	59,92164	4,57836	32	73,5127	-4,1127
13	93,94378	2,156216	33	62,25448	0,745521
14	79,66826	-0,96826	34	71,1893	4,210695
15	68,98959	-0,08959	35	57,12921	2,670792
16	80,24867	-4,04867	36	46,04786	2,752142
17	66,15092	1,249078	37	68,44524	8,854756
18	55,29706	0,502937	38	54,24773	0,052274
19	85,5676	-6,6676	39	43,262	-5,462
20	71,35918	-0,55918			

Tabela B.7 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 3 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vsa/Vaglo para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Idade 3 dias		
R múltiplo	0,971946	SA	CV	
R-Quadrado	0,94468			
R-quadrado ajustado	0,934918			
Erro padrão	3,132047			
Observações	21			

ANOVA					
	gi	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	2847,784	949,2614	96,76744	6,9E-11
Resíduo	17	166,7652	9,80972		
Total	20	3014,55			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-76,7969	7,389837	-10,3922	8,78E-09	-92,3882	-61,2057	-92,3882	-61,2057
Vaglo/Vpasta	155,7537	13,19307	11,80573	1,29E-09	127,9187	183,5887	127,9187	183,5887
Vcim/Vaglo	52,44003	3,677002	14,26163	6,88E-11	44,68222	60,19784	44,68222	60,19784
Vsa/Vaglo	35,2643	6,621945	5,325369	5,58E-05	21,2932	49,2354	21,2932	49,2354

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc3	Resíduos
1	56,57506	0,72494
2	45,51287	-1,71287
3	36,87558	-6,57558
4	55,81436	1,085637
5	44,71493	3,685073
6	36,1088	1,891199
7	55,15741	2,342591
8	44,01831	-1,11831
9	35,56581	-1,96581
10	48,14082	-1,34082
11	37,01366	-0,21366
12	28,5508	4,349197
13	41,29695	-6,29695
14	30,08575	-1,78575
15	21,62091	3,57909
16	43,55685	3,743151
17	32,46593	0,134075
18	23,80619	-0,50619
19	32,43195	0,468051
20	21,26421	-0,46421
21	12,62286	-0,02286

Tabela B.8 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 7 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vsa/Vaglo para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Idade 7 dias	
R múltiplo	0,975573	SA	CV
R-Quadrado	0,951743		
R-quadrado ajustado	0,943227		
Erro padrão	2,895478		
Observações	21		

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	2810,921	936,9737	111,7601	2,17E-11
Resíduo	17	142,5245	8,383795		
Total	20	2953,446			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-71,7974	6,831671	-10,5095	7,44E-09	-86,211	-57,3838	-86,211	-57,3838
Vaglo/Vpasta	172,8192	12,19657	14,16949	7,62E-11	147,0866	198,5517	147,0866	198,5517
Vcim/Vaglo	44,07017	3,399272	12,96459	3,06E-10	36,89832	51,24201	36,89832	51,24201
Vsa/Vaglo	45,93523	6,121779	7,503575	8,63E-07	33,01938	58,85107	33,01938	58,85107

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc7	Resíduos
1	62,0722	-0,0722
2	49,79795	-3,69795
3	40,2143	-4,3143
4	64,06048	-2,76048
5	51,76273	3,237267
6	42,22984	3,470158
7	65,9872	2,312799
8	53,61939	-0,91939
9	44,27068	-1,37068
10	57,98607	0,513933
11	45,6587	1,541304
12	36,25129	4,848711
13	54,89647	-3,79647
14	42,45412	-2,05412
15	33,07191	-0,17191
16	51,93197	1,268029
17	39,63887	1,561132
18	30,00666	1,193341
19	43,32001	3,479987
20	30,92866	-1,62866
21	21,3405	-2,6405

Tabela B.9 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 28 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vsa/Vaglo para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		28 dias	SA	CV
R múltiplo	0,97289			
R-Quadrado	0,946514			
R-quadrado ajustado	0,937076			
Erro padrão	3,647795			
Observações	21			

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	4003,121	1334,374	100,2805	5,19E-11
Resíduo	17	226,209	13,30641		
Total	20	4229,33			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-58,6316	8,606707	-6,81232	3,02E-06	-76,7902	-40,4731	-76,7902	-40,4731
Vaglo/Vpasta	172,2522	15,36554	11,21029	2,83E-09	139,8337	204,6707	139,8337	204,6707
Vcim/Vaglo	36,79367	4,282487	8,59166	1,36E-07	27,7584	45,82894	27,7584	45,82894
Vsa/Vaglo	95,81234	7,712368	12,42321	5,91E-10	79,54065	112,084	79,54065	112,084

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc28	Resíduos
1	67,66686	-3,06686
2	55,43289	-1,93289
3	45,88068	-2,28068
4	77,38639	-2,18639
5	65,17769	4,822314
6	55,72028	8,979721
7	86,56192	-1,66192
8	74,21219	0,787806
9	64,97585	-2,97585
10	72,28558	-1,98558
11	60,04595	-0,24595
12	50,69889	2,801108
13	76,67573	3,82427
14	64,25484	-1,45484
15	54,97372	-5,07372
16	59,73469	-0,13469
17	47,48849	-0,08849
18	37,87593	0,724068
19	53,03651	4,863486
20	40,68581	-0,98581
21	31,12911	-2,72911

Tabela B.10 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 91 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vsa/Vaglo para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão					
R múltiplo	0,964822	91 dias			
R-Quadrado	0,930882	SA	CV		
R-quadrado ajustado	0,918684				
Erro padrão	4,256225				
Observações	21				

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	4147,63	1382,543	76,31844	4,55E-10
Resíduo	17	307,9627	18,11545		
Total	20	4455,592			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-42,3503	10,04225	-4,21721	0,00058	-63,5376	-21,163	-63,5376	-21,163
Vaglo/Vpasta	187,2414	17,92842	10,44383	8,16E-09	149,4157	225,0671	149,4157	225,0671
Vcim/Vaglo	19,13525	4,99678	3,829517	0,001342	8,592956	29,67755	8,592956	29,67755
Vsa/Vaglo	95,71973	8,998744	10,63701	6,22E-09	76,73401	114,7054	76,73401	114,7054

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc91	Resíduos
1	74,07841	-0,77841
2	60,77985	-1,87985
3	50,39642	-1,89642
4	86,32639	-6,92639
5	73,06589	2,534108
6	62,79513	6,504875
7	97,87808	-2,87808
8	84,44881	1,651195
9	74,42649	-0,72649
10	84,49821	-3,79821
11	71,20654	3,393461
12	61,00537	3,494629
13	93,86533	2,234667
14	80,3666	-1,6666
15	70,26692	-1,36692
16	71,81702	3,582983
17	58,52441	1,275589
18	48,04042	0,759579
19	70,05097	7,249027
20	56,62553	-2,32553
21	46,23721	-8,43721

Tabela B.11 - Estatística de regressão entre Log Q91 com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vsa/Vaglo para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		log Q 91	SA	CV
R múltiplo	0,96657			
R-Quadrado	0,934257			
R-quadrado ajustado	0,922656			
Erro padrão	0,112381			
Observações	21			

ANOVA

	gi	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	3,051058	1,017019	80,52779	2,98E-10
Resíduo	17	0,2147	0,012629		
Total	20	3,265758			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	3,114054	0,265154	11,74432	1,4E-09	2,554627	3,673481	2,554627	3,673481
Vaglo/Vpasta	-1,48149	0,473379	-3,1296	0,006105	-2,48023	-0,48274	-2,48023	-0,48274
Vcim/Vaglo	0,679717	0,131934	5,15194	7,98E-05	0,40136	0,958074	0,40136	0,958074
Vsa/Vaglo	-2,93731	0,237601	-12,3624	6,37E-10	-3,43861	-2,43602	-3,43861	-2,43602

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto log Q91	Resíduos
1	3,023968	0,186083
2	3,129188	0,123422
3	3,211344	0,060266
4	2,519447	-0,15583
5	2,621801	-0,18405
6	2,700736	-0,14564
7	2,04586	0,127327
8	2,153299	0,074587
9	2,228294	0,087676
10	2,400909	-0,03542
11	2,503519	-0,06577
12	2,583791	-0,01325
13	1,863245	0,023246
14	1,970898	0,015873
15	2,047724	-0,01834
16	2,788422	-0,05764
17	2,892829	-0,10395
18	2,977172	-0,06336
19	2,582664	-0,03984
20	2,688889	0,026279
21	2,771083	0,158336

Tabela B.12 - Estatística de regressão entre V_{super}/V_{pasta} com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} e V_{sa}/V_{aglo} para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		SA	CV
R múltiplo	0,918691		
R-Quadrado	0,843994		
R-quadrado ajustado	0,816463		
Erro padrão	0,007103		
Observações	21		

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	0,00464	0,001547	30,65665	4,41E-07
Resíduo	17	0,000858	5,05E-05		
Total	20	0,005498			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,09622	0,016759	-5,74146	2,4E-05	-0,13158	-0,06086	-0,13158	-0,06086
Vaglo/Vpasta	0,253969	0,02992	8,488401	1,61E-07	0,190844	0,317094	0,190844	0,317094
Vcim/Vaglo	0,000665	0,008339	0,079734	0,93738	-0,01693	0,018258	-0,01693	0,018258
Vsa/Vaglo	0,04959	0,015017	3,302163	0,00421	0,017906	0,081274	0,017906	0,081274

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto V_{super}/V_{pasta}	Resíduos
1	0,036411	-0,00435
2	0,018373	0,002352
3	0,004289	0,004309
4	0,045585	-0,0063
5	0,027552	-0,00045
6	0,013578	0,001233
7	0,054278	-0,00061
8	0,036085	0,000478
9	0,022412	0,004014
10	0,04803	-0,00222
11	0,029961	-0,00011
12	0,016017	0,004434
13	0,0585	0,003728
14	0,040221	-0,00512
15	0,026411	-0,00092
16	0,041055	-0,00253
17	0,023049	-0,00305
18	0,008786	0,003023
19	0,045346	0,020995
20	0,027136	-0,01428
21	0,013046	-0,00463

Tabela B.13 - Estatística de regressão entre Vpasta/Vconc com Vaglo/Vpasta para os concretos sem CCA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		SA	CV					
R múltiplo	0,995124							
R-Quadrado	0,990272							
R-quadrado ajustado	0,98976							
Erro padrão	0,004922							
Observações	21							
ANOVA								
	gl	SQ	MQ	F	F de significação			
Regressão	1	0,046862	0,046862	1934,115	1,4E-20			
Resíduo	19	0,00046	2,42E-05					
Total	20	0,047323						
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,07901	0,009607	-8,22434	1,11E-07	-0,09912	-0,0589	-0,09912	-0,0589
Vaglo/Vpasta	0,884168	0,020105	43,97857	1,4E-20	0,842089	0,926247	0,842089	0,926247

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto Vpasta/Vconc	Resíduos
1	0,380417	0,003234
2	0,31762	0,000837
3	0,268589	0,010552
4	0,389297	0,002759
5	0,326372	-0,00172
6	0,277593	0,005976
7	0,397944	0,002654
8	0,334672	-0,00373
9	0,286829	0,00077
10	0,399252	0,002419
11	0,336208	-0,00456
12	0,28752	0,000975
13	0,417068	0,002359
14	0,353499	-0,00877
15	0,305179	-0,00702
16	0,397292	0,002449
17	0,334606	-0,00465
18	0,284949	0,00297
19	0,412841	0,003194
20	0,349445	-0,0072
21	0,300391	-0,00349

Tabela B.14 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 3 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vcca/Vaglo para os concretos sem SA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		Idade 3 dias	CCA	CV
R múltiplo	0,978902			
R-Quadrado	0,958249			
R-quadrado ajustado	0,952803			
Erro padrão	2,607604			
Observações	27			

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	3589,383	1196,461	175,9605	5,32E-16
Resíduo	23	156,3908	6,799601		
Total	26	3745,774			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-82,0997	5,498244	-14,932	2,52E-13	-93,4737	-70,7257	-93,4737	-70,7257
Vaglo/Vpasta	165,0884	9,67209	17,06853	1,48E-14	145,0802	185,0966	145,0802	185,0966
Vcim/Vaglo	52,27692	2,914132	17,9391	5,1E-15	46,24858	58,30525	46,24858	58,30525
Vcca/Vaglo	35,84197	3,784525	9,470666	2,11E-09	28,0131	43,67085	28,0131	43,67085

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc3	Resíduos	Observação	Previsto fc3	Resíduos
1	55,95962	1,340376	15	27,23426	-2,63426
2	44,23445	-0,43445	16	41,53476	-0,63476
3	35,07951	-4,77951	17	29,90618	-1,10618
4	55,51427	-0,71427	18	20,76292	-1,46292
5	43,72807	0,671934	19	46,18916	-4,08916
6	34,64941	-0,24941	20	34,35273	-3,55273
7	55,15095	-4,35095	21	24,97438	1,02562
8	43,31964	0,680364	22	43,16931	4,130689
9	34,33099	2,469012	23	31,41673	1,183267
10	54,90637	3,993631	24	22,23246	1,067537
11	43,27032	3,529679	25	32,2517	0,648301
12	33,9413	3,258699	26	20,41465	0,385346
13	48,00546	-0,00546	27	11,25541	1,344594
14	36,21499	-1,71499			

Tabela B.15 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 7 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vcca/Vaglo para os concretos sem SA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		7 dias	CCA	CV
R múltiplo	0,955242			
R-Quadrado	0,912488			
R-quadrado ajustado	0,901073			
Erro padrão	3,773717			
Observações	27			

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	3415,261	1138,42	79,93997	2,58E-12
Resíduo	23	327,5416	14,24094		
Total	26	3742,803			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-70,7737	7,957042	-8,89447	6,64E-09	-87,2341	-54,3133	-87,2341	-54,3133
Vaglo/Vpasta	170,6873	13,99742	12,1942	1,6E-11	141,7315	199,6432	141,7315	199,6432
Vcim/Vaglo	41,49797	4,217323	9,839884	1,04E-09	32,77378	50,22216	32,77378	50,22216
Vcca/Vaglo	43,14916	5,476953	7,878315	5,57E-08	31,81924	54,47909	31,81924	54,47909

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc7	Resíduos	Observação	Previsto fc7	Resíduos
1	59,41597	2,584031	15	34,47176	-1,37176
2	47,29314	-1,19314	16	53,28374	0,516262
3	37,8277	-1,9277	17	41,25818	-3,95818
4	61,55171	-5,15171	18	31,81426	-6,71426
5	49,38205	-0,68205	19	58,87804	-1,47804
6	40,01025	0,589748	20	46,64271	-2,74271
7	63,58924	-6,98924	21	36,93709	2,162911
8	51,34922	-2,44922	22	50,01941	3,180587
9	42,08278	1,217223	23	37,87982	3,320177
10	65,51589	5,384114	24	28,36304	2,836965
11	53,49206	5,007945	25	42,05	4,750001
12	43,82173	6,67827	26	29,8115	-0,5115
13	55,94513	-1,14513	27	20,34162	-1,64162
14	43,77198	-0,27198			

Tabela B.16 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 28 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vcca/Vaglo para os concretos sem SA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão					
R múltiplo	0,96613	28 dias			
R-Quadrado	0,933408	CCA	CV		
R-quadrado ajustado	0,924722				
Erro padrão	3,699754				
Observações	27				

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	4412,879	1470,96	107,462	1,13E-13
Resíduo	23	314,8282	13,68818		
Total	26	4727,707			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-71,7315	7,801088	-9,19506	3,63E-09	-87,8692	-55,5937	-87,8692	-55,5937
Vaglo/Vpasta	196,0676	13,72308	14,28744	6,31E-13	167,6793	224,4559	167,6793	224,4559
Vcim/Vaglo	38,77032	4,134666	9,376894	2,54E-09	30,21713	47,32352	30,21713	47,32352
Vcca/Vaglo	52,94799	5,369607	9,860682	9,95E-10	41,84013	64,05585	41,84013	64,05585

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc28	Resíduos	Observação	Previsto fc28	Resíduos
1	68,91853	-4,31853	15	43,51026	0,989739
2	54,99309	-1,49309	16	67,86899	4,63101
3	44,1202	-0,5202	17	54,05382	-2,85382
4	73,08203	-3,48203	18	43,21099	-7,31099
5	59,11351	2,486488	19	74,73909	-1,23909
6	48,35791	2,942092	20	60,68588	-4,98588
7	77,01214	-6,01214	21	49,53185	-2,03185
8	62,94718	-0,94718	22	60,83813	-1,23813
9	52,32069	-1,12069	23	46,90166	0,498342
10	80,66097	4,839029	24	35,95486	2,645137
11	66,85378	2,946224	25	54,0362	3,863797
12	55,72912	5,770884	26	39,97791	-0,27791
13	68,17656	3,823439	27	29,0999	-0,6999
14	54,20473	3,095272			

Tabela B.17 - Estatística de regressão entre Resistência à Compressão na idade de 91 dias com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vcca/Vaglo para os concretos sem SA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		91 dias	CCA	CV
R múltiplo	0,945053			
R-Quadrado	0,893124			
R-quadrado ajustado	0,879184			
Erro padrão	5,052168			
Observações	27			

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	4905,879	1635,293	64,06782	2,55E-11
Resíduo	23	587,0613	25,5244		
Total	26	5492,94			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-63,9068	10,65271	-5,99911	4,07E-06	-85,9436	-41,87	-85,9436	-41,87
Vaglo/Vpasta	220,0569	18,73943	11,74299	3,4E-11	181,2915	258,8223	181,2915	258,8223
Vcim/Vaglo	25,49275	5,646058	4,515141	0,000156	13,81301	37,1725	13,81301	37,1725
Vcca/Vaglo	48,98481	7,332422	6,680577	8,15E-07	33,81656	64,15306	33,81656	64,15306

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto fc91	Resíduos	Observação	Previsto fc91	Resíduos
1	75,93084	-2,63084	15	51,65502	-2,15502
2	60,3016	-1,4016	16	82,62371	4,176291
3	48,09839	0,401608	17	67,12201	-5,12201
4	81,65927	-5,45927	18	54,93878	-10,5388
5	65,98829	1,411709	19	89,1923	-3,6923
6	53,92272	1,877281	20	73,41595	-4,01595
7	87,05134	-8,15134	21	60,91065	2,089353
8	71,26248	-0,46248	22	72,35712	3,042878
9	59,34682	-0,54682	23	56,73211	3,067889
10	92,03272	7,867279	24	44,41575	4,384247
11	76,53897	4,461027	25	69,4874	7,812603
12	64,04306	9,156942	26	53,70904	0,590964
13	79,36806	-1,76806	27	41,50008	-3,70008
14	63,69551	-0,69551			

Tabela B.18 - Estatística de regressão entre Log Q91 com Vaglo/Vpasta, Vcim/Vaglo e Vcca/Vaglo para os concretos sem SA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,955382
R-Quadrado	0,912754
R-quadrado ajustado	0,901375
Erro padrão	0,088668
Observações	27

log Q 91
CCA SA

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	1,891775	0,630592	80,20792	2,49E-12
Resíduo	23	0,180825	0,007862		
Total	26	2,072601			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	3,18132	0,18696	17,01608	1,58E-14	2,794565	3,568075	2,794565	3,568075
Vaglo/Vpasta	-1,71183	0,328885	-5,20496	2,81E-05	-2,39218	-1,03148	-2,39218	-1,03148
Vcim/Vaglo	0,823744	0,099091	8,313022	2,21E-08	0,618759	1,028728	0,618759	1,028728
Vcca/Vaglo	-0,75574	0,128687	-5,87271	5,51E-06	-1,02195	-0,48953	-1,02195	-0,48953

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto log Q91	Resíduos
1	3,115569	0,094482
2	3,237149	0,015461
3	3,332079	-0,06047
4	2,876504	0,058499
5	2,997191	0,022341
6	3,089943	0,022327
7	2,653768	0,058039
8	2,777149	0,035764
9	2,867814	0,152132
10	2,451732	-0,16617
11	2,571745	-0,07206
12	2,670818	-0,06122
13	2,717956	0,012018
14	2,838574	0,016945

Observação	Previsto log Q91	Resíduos
15	2,933554	0,032588
16	2,37839	0,115764
17	2,499142	0,061959
18	2,593321	0,044168
19	2,277936	0,007622
20	2,400501	-0,01669
21	2,498361	-0,06861
22	2,831707	-0,10092
23	2,952312	-0,16344
24	3,049835	-0,13602
25	2,583821	-0,041
26	2,706562	0,008605
27	2,801536	0,127883

Tabela B.19 - Estatística de regressão entre V_{super}/V_{pasta} com V_{aglo}/V_{pasta} , V_{cim}/V_{aglo} e V_{cca}/V_{aglo} para os concretos sem SA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,952075
R-Quadrado	0,906448
R-quadrado ajustado	0,894245
Erro padrão	0,006915
Observações	27

CCA CV

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	0,010657	0,003552	74,28394	5,55E-12
Resíduo	23	0,0011	4,78E-05		
Total	26	0,011757			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,12237	0,014581	-8,39204	1,87E-08	-0,15253	-0,0922	-0,15253	-0,0922
Vaglo/Vpasta	0,307913	0,02565	12,00418	2,19E-11	0,254851	0,360975	0,254851	0,360975
Vcim/Vaglo	0,001801	0,007728	0,233021	0,817807	-0,01419	0,017788	-0,01419	0,017788
Vcca/Vaglo	0,062258	0,010037	6,203093	2,5E-06	0,041496	0,08302	0,041496	0,08302

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto V_{super}/V_{pasta}	Resíduos
1	0,039429	-0,00737
2	0,01756	0,003165
3	0,000485	0,008113
4	0,051286	-0,00447
5	0,029383	0,001039
6	0,012522	0,005436
7	0,062402	-0,0013
8	0,040298	0,00271
9	0,023665	-0,00325
10	0,072597	0,00193
11	0,050928	0,001073
12	0,033406	-0,00455
13	0,05404	-0,00834
14	0,032138	-0,00235

Observação	Previsto V_{super}/V_{pasta}	Resíduos
15	0,015231	0,005183
16	0,066881	0,005882
17	0,045192	0,005736
18	0,028138	-0,00543
19	0,0755	0,004239
20	0,053423	0,003497
21	0,035932	-0,00775
22	0,044757	-0,00623
23	0,022925	-0,00292
24	0,005635	0,006174
25	0,049696	0,016645
26	0,027618	-0,01476
27	0,010535	-0,00211

Tabela B.20 - Estatística de regressão entre Vpasta/Vconc com Vaglo/Vpasta para os concretos sem SA produzidos por Isaia

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão		CCA	CV
R múltiplo	0,994403		
R-Quadrado	0,988837		
R-quadrado ajustado	0,98839		
Erro padrão	0,005311		
Observações	27		

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,062466	0,062466	2214,533	6,28E-26
Resíduo	25	0,000705	2,82E-05		
Total	26	0,063172			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,08483	0,009171	-9,25002	1,51E-09	-0,10372	-0,06594	-0,10372	-0,06594
Vaglo/Vpasta	0,894496	0,019008	47,05883	6,28E-26	0,855348	0,933644	0,855348	0,933644

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Previsto Vpasta/Vconc	Resíduos	Observação	Previsto Vpasta/Vconc	Resíduos
1	0,37996	0,00369	15	0,286925	0,002093
2	0,31643	0,002027	16	0,418085	0,003832
3	0,266826	0,012314	17	0,355149	-0,00956
4	0,389948	0,003045	18	0,305349	-0,00595
5	0,326165	-0,00074	19	0,421801	0,002083
6	0,277044	0,006947	20	0,357598	-0,00974
7	0,399506	0,003081	21	0,307037	-0,00539
8	0,335365	-0,00287	22	0,397033	0,002708
9	0,286791	0,002152	23	0,333615	-0,00366
10	0,408591	0,003339	24	0,283377	0,004542
11	0,345576	-0,00712	25	0,412764	0,003271
12	0,29491	-0,00037	26	0,348627	-0,00638
13	0,399971	0,002637	27	0,299	-0,0021
14	0,3362	-0,00388			

ANEXO C

Software em Qbasic para o cálculo dos consumos de materiais para produção de concretos de menor custo que contenham adição de mais de um tipo de pozolana

```

100 CLS
110 PRINT "Entre com os dados solicitados:"
190 DO
193 LOCATE 3, 1: PRINT SPACES$(79)
194 LOCATE 4, 1: PRINT SPACES$(79)
195 LOCATE 5, 1: PRINT SPACES$(79)
196 LOCATE 6, 1: PRINT SPACES$(79)
200 LOCATE 3, 1: INPUT "K1 = ", k1
210 LOCATE 3, 21: INPUT "K2 = ", k2
220 LOCATE 3, 41: INPUT "K3 = ", k3
230 LOCATE 3, 61: INPUT "K4 = ", k4
240 LOCATE 4, 1: INPUT "K5 = ", k5
250 LOCATE 4, 21: INPUT "K6 = ", k6
260 LOCATE 4, 41: INPUT "K7 = ", k7
270 LOCATE 4, 61: INPUT "K8 = ", k8
280 LOCATE 5, 1: INPUT "K9 = ", k9
290 LOCATE 5, 21: INPUT "K10 = ", k10
300 LOCATE 5, 41: INPUT "K11 = ", k11
310 LOCATE 5, 61: INPUT "K12 = ", k12
320 LOCATE 6, 1: INPUT "K13 = ", k13
330 LOCATE 6, 21: INPUT "K14 = ", k14
340 LOCATE 6, 41: INPUT "Confirma (S/N) "; confirm1$
350 IF confirm1$ = "s" OR confirm1$ = "S" THEN EXIT DO
370 LOOP
380 DO
383 LOCATE 8, 1: PRINT SPACES$(79)
384 LOCATE 9, 1: PRINT SPACES$(79)
385 LOCATE 10, 1: PRINT SPACES$(79)
386 LOCATE 11, 1: PRINT SPACES$(79)
390 LOCATE 8, 1: INPUT "R$cim/m3 cim = ", Rcimm3cim
400 LOCATE 8, 41: INPUT "R$super/m3 super = ", Rsuperm3super
410 LOCATE 9, 1: INPUT "R$poz1/m3 poz1 = ", Rpoz1m3poz1
420 LOCATE 9, 41: INPUT "R$poz2/m3 poz2 = ", Rpoz2m3poz2
430 LOCATE 10, 1: INPUT "R$areia/m3 areia = ", Rareiam3areia
435 LOCATE 10, 41: INPUT "R$pedra/m3 pedra = ", Rpedram3pedra
440 LOCATE 11, 41: INPUT "Confirma (S/N) "; confirm2$
450 IF confirm2$ = "s" OR confirm2$ = "S" THEN EXIT DO
460 LOOP
470 DO
473 LOCATE 13, 1: PRINT SPACES$(79)
480 LOCATE 13, 1: INPUT "fcj min = ", fcjmin

```

```

490 LOCATE 13, 21: INPUT "Q90 max = ", q90max
500 LOCATE 13, 41: INPUT "Confirma (S/N) "; confirm3$
510 IF confirm3$ = "s" OR confirm3$ = "S" THEN EXIT DO
520 LOOP
530 DO
533 LOCATE 15, 1: PRINT SPACES$(79)
534 LOCATE 16, 1: PRINT SPACES$(79)
535 LOCATE 17, 1: PRINT SPACES$(79)
536 LOCATE 18, 1: PRINT SPACES$(79)
537 LOCATE 19, 1: PRINT SPACES$(79)
540 LOCATE 15, 1: INPUT "Vaglo/Vpasta min = ", VagloVpastamin
550 LOCATE 15, 31: INPUT "Vaglo/Vpasta max = ", VagloVpastamax
560 LOCATE 15, 61: INPUT "I1 = ", i1
570 LOCATE 16, 1: INPUT "Vcim/Vaglo min = ", VcimVaglomin
580 LOCATE 16, 31: INPUT "Vcim/Vaglo max = ", VcimVaglomax
590 LOCATE 16, 61: INPUT "I2 = ", i2
600 LOCATE 17, 1: INPUT "Vpoz1/Vaglo min = ", Vpoz1Vaglomin
610 LOCATE 17, 31: INPUT "Vpoz1/Vaglo max = ", Vpoz1Vaglomax
620 LOCATE 17, 61: INPUT "I3 = ", i3
630 LOCATE 18, 1: INPUT "Varg/Vconc = ", VargVconc
640 LOCATE 18, 31: INPUT "R$arg/m3 conc melhor = ", Rargm3concmelhor
650 LOCATE 19, 1: INPUT "Confirma (S/N) "; confirm4$
660 IF confirm4$ = "s" OR confirm4$ = "S" THEN EXIT DO
670 LOOP
700 CLS
900 PRINT "**** CALCULANDO ****"
901 VagloVpastamelhor = 0
902 VcimVaglomelhor = 0
903 Vpoz1Vaglomelhor = 0
904 Vpoz2Vaglomelhor = 0
905 VsuperVpastamelhor = 0
906 VpastaVconcmelhor = 0
1000 VagloVpasta = VagloVpastamin
1100 GOTO 1400
1200 VagloVpasta = VagloVpasta + i1
1300 IF VagloVpasta <= VagloVpastamax THEN GOTO 1400 ELSE GOTO 4650
1400 VcimVaglo = VcimVaglomin
1500 GOTO 1800
1600 VcimVaglo = VcimVaglo + i2
1700 IF VcimVaglo <= VcimVaglomax THEN GOTO 1800 ELSE GOTO 1200
1800 Vpoz1Vaglo = Vpoz1Vaglomin

```

```

1900 GOTO 2200
2000 Vpoz1Vaglo = Vpoz1Vaglo + i3
2100 IF Vpoz1Vaglo <= Vpoz1Vaglomax THEN GOTO 2200 ELSE GOTO 1600
2200 IF (VcimVaglo + Vpoz1Vaglo) <= 1 THEN GOTO 2300 ELSE GOTO 1600
2300 fcj = k1 + k2 * VagloVpasta + k3 * VcimVaglo + k4 * Vpoz1Vaglo
2400 IF fcj >= fcjmin THEN GOTO 2500 ELSE GOTO 2000
2500 logq90 = k5 + k6 * VagloVpasta + k7 * VcimVaglo + k8 * Vpoz1Vaglo
2600 q90 = 10 ^ logq90
2700 IF q90 <= q90max THEN GOTO 2800 ELSE GOTO 2000
2800 VsuperVpasta = k9 + k10 * VagloVpasta + k11 * VcimVaglo + k12 * Vpoz1Vaglo
2900 VpastaVconc = k13 + k14 * VagloVpasta
3000 Rcimm3conc = VcimVaglo * VagloVpasta * VpastaVconc * Rcimm3cim
3100 Rsuperm3conc = VsuperVpasta * VpastaVconc * Rsuperm3super
3200 Rpoz1m3conc = Vpoz1Vaglo * VagloVpasta * VpastaVconc * Rpoz1m3poz1
3300 Vpoz2Vaglo = 1 - (VcimVaglo + Vpoz1Vaglo)
3400 Rpoz2m3conc = Vpoz2Vaglo * VagloVpasta * VpastaVconc * Rpoz2m3poz2
3500 VareiaVconc = VargVconc - VpastaVconc
3600 Rareiam3conc = VareiaVconc * Rareiam3areia
3700 Rargm3conc = Rcimm3conc + Rsuperm3conc + Rpoz1m3conc + Rpoz2m3conc + Rareiam3conc
3800 IF Rargm3conc <= Rargm3concmelhor THEN GOTO 3900 ELSE GOTO 2000
3900 Rargm3concmelhor = Rargm3conc
4000 VagloVpastamelhor = VagloVpasta
4100 VcimVaglomelhor = VcimVaglo
4200 Vpoz1Vaglomelhor = Vpoz1Vaglo
4300 Vpoz2Vaglomelhor = Vpoz2Vaglo
4400 VsuperVpastamelhor = VsuperVpasta
4500 VpastaVconcmelhor = VpastaVconc
4510 fcjmelhor = fcj
4520 q90melhor = q90
4600 GOTO 2000
4650 IF VagloVpastamelhor = 0 THEN GOTO 4670 ELSE GOTO 4700
4670 CLS : LOCATE 10, 5: PRINT "**** Nao existe traco que satisfaca todas as condicoes ****"
4680 GOTO 7000
4700 CLS : PRINT "R$arg/m3 conc melhor = "; Rargm3concmelhor
4800 PRINT "Vaglo/Vpasta melhor = "; VagloVpastamelhor
4900 PRINT "Vcim/Vaglo melhor = "; VcimVaglomelhor
5000 PRINT "Vpoz1/Vaglo melhor = "; Vpoz1Vaglomelhor
5100 PRINT "Vpoz2/Vaglo melhor = "; Vpoz2Vaglomelhor
5200 PRINT "Vsuper/Vpasta melhor = "; VsuperVpastamelhor
5300 PRINT "Vpasta/Vconc melhor = "; VpastaVconcmelhor
5350 PRINT "fcj melhor = "; fcjmelhor

```

```

5360 PRINT "Q90 melhor = "; q90melhor
5400 Vcimm3conc = VcimVaglomelhor * VagloVpastamelhor * VpastaVconcmelhor * 1000
5500 Vpoz1m3conc = Vpoz1Vaglomelhor * VagloVpastamelhor * VpastaVconcmelhor * 1000
5600 Vpoz2m3conc = Vpoz2Vaglomelhor * VagloVpastamelhor * VpastaVconcmelhor * 1000
5700 Vsuperm3conc = VsuperVpastamelhor * VpastaVconcmelhor * 1000
5800 Vareiam3conc = (VargVconc - VpastaVconcmelhor) * 1000
5900 Vpedram3conc = (1 - VargVconc) * 1000
5905 Vaguam3conc = 1000 - (Vcimm3conc + Vpoz1m3conc + Vpoz2m3conc + Vsuperm3conc + Vareiam3conc +
Vpedram3conc)
5910 Rpedram3concmelhor = Rpedram3pedra * (Vpedram3conc / 1000)
5920 Rconcm3concmelhor = Rargm3concmelhor + Rpedram3concmelhor
6000 PRINT "Vcim/m3 conc = "; Vcimm3conc
6010 PRINT "Vpoz1/m3 conc = "; Vpoz1m3conc
6020 PRINT "Vpoz2/m3 conc = "; Vpoz2m3conc
6030 PRINT "Vsuper/m3 conc = "; Vsuperm3conc
6035 PRINT "Vaguam3 conc = "; Vaguam3conc
6040 PRINT "Vareia/m3 conc = "; Vareiam3conc
6050 PRINT "Vpedra/m3 conc = "; Vpedram3conc
6060 PRINT "R$ concreto melhor = "; Rconcm3concmelhor
7000 END
7010 SYSTEM

```


REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, D.A. **Desing of concrete mixtures**. Structural Materials Research Laboratory. Lewis Institute Bulletin, n.1. Chicago, 1925, 20 p.
- ADDIS, B.J. & ALESANDER, M.G. **A method of proportioning trial mixes for high-strength concrete**. High-Strength Concrete, ACI SP 121, 1990, p. 207-308.
- AİTICIN, P.C.; JOLICOEUR, C.; MacGREGOR, J.G. **Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't**. CONCRETE INTERNATIONAL. May, 1994, p. 45-52.
- AİTCIN, P.C., BAALBAKI, M. **Concrete admixtures – Key components of modern concrete**. Concrete Technology. New Trends, Industrial Applications. Proceeding of tht International RILEM workshop. E & FN SPON . London, 1995, p. 33-47.
- AL-KHALAF, M.N. & YOUSIFT, H.A. **Use of rice husk ash in concrete**. The International Journal of Cement Composites and Lighthweight Concrete. Volume 6. Number 4. 1984, p. 241-248.
- ALVES, J. D. **Manual de tecnologia do concreto**. Editora da UFG. Goiânia, 1993, 194 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto armado**. NBR-6118. Rio de Janeiro, 1978.
- _____. **Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone**. NBR-7223. Rio de Janeiro, 1982.
- _____. **Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica**. NBR-6474. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da área específica**. NBR-7224. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos**. NBR-9831. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **Cimento Portland comum**. NBR-5732. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **Cimento Portland de alta resistência inicial**. NBR-5733. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **Cimento Portland de alto forno**. NBR-5735. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **Cimento Portland pozolânico**. NBR-5736. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **Cimento Portland resistente a sulfatos**. NBR-5737. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **Cimento Portland composto**. NBR-11578. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **Cimento Portland – determinação da resistência à compressão**. NBR-7215. Rio de Janeiro, 1991.

- _____. **Concreto para fins estruturais – classificação por grupos de resistência.** NBR-8953. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **Materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento.** NBR-5752. Rio de Janeiro, 1992.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.** ASTM Standard C 1202-94. USA. 1994.
- BABU, K.G. & RAO, G.S. **Efficiency of fly ash concrete with age.** Cement and Concrete Research, Vol. 26, N° 3, USA, 1996, p. 464-465
- BOETENG, A. A. & SKEET, D.A. **Incineration of rice hull for use as a cementitious material: Guyana experience.** Cement and Concrete Research, 1990, v. 20, p. 795-802.
- BONAVETTI, V.; DONZA, H.; IRASSAR, E.F. **High-strength concrete with limestone filler cements.** SP 186-33 Proceedings of Second CANMET/ACI International Conference. Gramado, Brazil, 1999, p. 567-580.
- BOULAY, C. & LARRARD, F. **The sand-box. A new capping system for testing HPC cylinders.** Concrete International. April, 1993, p. 63-66.
- BUCHER, H.R.E. & RODRIGUES, P.P.F. **Correlações entre as resistências mecânicas do concreto.** In: Seminário Sobre Controle da Resistência do Concreto. Anais. Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, São Paulo, jun/julho 1983, 23 p.
- CABRERA, J.G & ATIS. **Design and properties of high-volume fly ash high-performance concrete.** SP 186-2. Proceedings of Second CANMET/ACI International Conference. Gramado, Brazil, 1999, p. 21-37.
- CALLEJA, J. **Adiciones y cementos com adiciones.** Materiales de construcion. no 190-191, Madrid, 1983, p. 25-52.
- CAMARGO, W. M. **Fixação na dosagem das propriedades finais dos concretos: correlação entre as propriedades de composição do concreto fresco e as propriedades tecnológicas do concreto endurecido.** In: Colóquio sobre dosagem do concreto. Anais. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, 1977, p. 15-45.
- CARNEIRO, F. L.L. **Dosagem dos concretos plásticos.** Rio de Janeiro, INT, 1937, 50 p.
- CARRASQUILLO, R.L; SLATE, F.O.; NILSON J.,A.H. **Properties of high strength concrete subject to short-term loads.** ACI Journal. Vol. 78, N° 3, 1981, p. 171-178.
- _____. **Microcracking and behavior of high strength concrete subject to short-term loading.** ACI Journal. Vol. 78, N° 3, 1981, p. 179-186.
- CARRAZEDO, R.; WILLRICH, F.L.; LIMA JR, H.C. **Dosagem de concretos de resistência superior à 100 MPa.** Anais do 42º Congresso Brasileiro do Concreto. Fortaleza, 2000, p. 136-145.

- CINCOTTO, M.A. & KAUPATEZ, R.M.Z. **Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica.** Tecnologia das edificações. Pini, São Paulo, 1988, p. 23-26.
- COOK, D.J. **Rice husk ash. Concrete technology and design.** Surrey University Press, London, 1986, p. 171-196.
- COUTINHO, A.S. **Fabrico e propriedades do betão.** Lisboa, LNEC, 1973, V. II, 590 p.
- DAFICO, D.A. **Contribuição ao estudo da dosagem do concreto de cimento Portland.** Dissertação de mestrado. UFSC. Florianópolis, 1997, 154 p.
- DAL MOLIN, D.C.C. & MONTEIRO, P.J.M. **Estudo do módulo de deformação de concretos de alta resistência com e sem adições de sílica ativa.** Proceedings: International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures. Florianópolis, Brazil, 1996, p. 213-224.
- DE LARRARD, F. **A method for proportioning high-strength concrete mixtures.** Cement, Concrete, and Aggregates. CCAGDP, Vol. 12, N^o 2, Summer 1990, p. 47-52.
- _____. **High-performance concrete: From the laboratory to practical utilization.** Concrete Technology. New Trends, Industrial Applications. Proceeding of the International RILEM workshop. E & FN SPON. London, 1995 - a, p. 177-196.
- _____. **A model for predicting the compressive strength of structural fly ash concrete.** SP 153-6. Proceedings: Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. ACI Fifth International Conference. Milwaukee, USA, 1995 - b, p. 99-108.
- DE LARRARD, F.; GORSE, J.F.; PUCH, C. **Comparative study of various silica fumes as additives in high-performance cementitious materials.** Materials and Structures, 25, n^o 149, 1992, p. 265-272.
- DIAZ, V.O. **Métodos para dosificar mezclas de hormigón.** EDITORIAL CIENTÍFICO - TECNICA. Ciudad de La Havana, 1990, 100p.
- _____. **Método de dosagem de concreto de alto desempenho.** Editora PINI. São Paulo, 1998.
- ERNST, W.G. **Minerais e rochas.** Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1971, 162 p.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Produção agrícola mundial.** <http://www.fao.org>, 2001.
- FARIAS, J.S.A. & RECENA, F.A.P. **Study for brazilian rice husk ash cement.** In: Proceedings of the Second International RILEN Symposium. H.S. Sobral. (ed) Salvador, 1990, p. 360-369.
- FUSCO, P.B. **Conceitos estatísticos associados à segurança das estruturas de concreto.** Volume 2. Grêmio Politécnico. DPL. São Paulo, 1975, 235 p.
- GAMBALE, E.A.; FONTOURA, J.T.F.; GUEDES, Q.M. **Estudo da fluência no concreto de elevado-desempenho.** International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures. Brazil, Florianópolis, 1996, p. 61-69.

- GJORV, O.E. **High-strength concrete**. Advances in Concrete Technology. CANMET. Ottawa, 1992, p. 21-78.
- GOLDMAN, A. & BENTUR, A. **The influence of microfillers on enhancement of concrete strength**. Cement and Concrete Research. Vol. 23, USA, 1993, p. 962-972.
- GUEDERT, L.O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza da casca de arroz como material pozolânico**. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia de produção e sistemas. UFSC. Florianópolis, 1989, 147 p.
- HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros de dosagem e controle dos concretos de cimento Portland**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987, 173 p.
- HELENE, P.R.L., TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. PINI/SENAI, 1995, 313 p.
- HOUSTON, D.F. **Rice, chemistry and technology**. American Association of Cereal Chemical. St. Paul. Minnesota, USA, 1972, p. 301-351.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola nacional**. <http://www.ibge.com.br>, 2001.
- ILER, R.K. **The chemistry of silica. Solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry**. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons. USA, 1979, 866 p.
- ISAIA, G.C.. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho : um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese de doutorado. EPUSP. São Paulo, 1995, 280 p.
- _____. **Método holístico para dosagem de concreto de alto desempenho com pozzolanas pelo critério durabilidade**. Anais do 4º Congresso Brasileiro de Cimento Portland. São Paulo, 1996, p. 329-346.
- _____. **Validade do ensaio de penetração de cloretos (ASTM C 1202) para avaliação da durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas**. International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures. Florianópolis, 1996, p. 554-565.
- JAMES, J. & RAO, M.S. **Reactivity of rice husk ash**. Cement and concrete research. V.16. 1986, p. 296-302.
- LOUGHNAN, F.C. **Chemical weathering of the silicate minerals**. American Elsevier Publishing Company Inc. New York, 1969, 154 p.
- LYSE, I. **Tests on consistency and strength of concrete having constant water content**. American Society for Testing and Materials, Proc., v. 32, part 2, dec., 1932, p. 629-636

- LUXAN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. **Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement.** Cement and Concrete research. Vol. 19, 1989, p. 63-68.
- MACEDO, P.H.S.; FERREIRA JR., S.; ANDRADE F., S.A.; GROSSI, L.C.; BALTHAZAR, M.A.B. **Estudo de correlações entre as resistências do concreto à compressão axial, compressão diametral e flexão, em função do tipo de textura superficial do agregado graúdo.** In: 23 REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Florianópolis, 1988, p. 1029-1048.
- MALHOTRA, V.M.; CARETTE, G.G.; SIVASUNDARAM, V. **Role of silica fume in concrete: a review.** Advances in Concrete Technology. Energy, Mines and Resources. CANMET, Ottawa, Canada, 1992, p. 925-991.
- MALHOTRA, M.V. **Fly ash, slag, silica fume, and rice-husk ash in concrete: a review.** Concrete International. April, 1993, p. 223-28.
- MEHTA, P.K. **Rice hull ash cement...high-quality, acid-resisting.** ACI Journal. American Concrete Institute. May, 1975, p. 235-236..
- _____. **Properties of blended cements made from rice husk ash.** ACI Journal. American Concrete Institute. September, 1977, p. 440-442.
- _____. **Pozzolanic and cementitious by products as mineral admixtures for concrete – a critical review.** Proceedings of CANET/ACI First International Conference, ACI, SP-79, Vol. 1, 1983, p. 1-46.
- _____. **Rice husk ash - A unique supplementary cementing material.** In: Advances in concrete technology. CANMET. Ottawa, 1992, p. 407-431.
- _____. **High-performance concrete technology for the future.** International congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Proceedings. Florianópolis. 1996, p. 1-14.
- _____. **High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material.** ACI Materials Journal. American Concrete Institute. September-october, 1997, p. 629-636.
- MEHTA, P.K. & PITT, N. **A new process of rice utilization.** In: International conference on the utilization of rice by-products. Valencia, Spain, 1974. Proceedings. Valencia: IATA, published in 1977, p. 45-58.
- MEHTA, P.K. & AİTCIN, P.C. **Principles underlying production of high-performance concrete.** Cement, concrete, and aggregates. CCAGDP, Vol. 12, Nº 2, Winter 1990, p. 70-78.
- MEHTA, P.K. & MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pinni, 1994, 573 p.
- NAWY, G.E. **Fundamentals of high strength high performance concrete.** Concrete design and construction series. Longman Group Limited, London, 1996.

- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Trad. Salvador Eugênio Giammusso. São Paulo, Pini, 2^a ed., 1997.
- PETRUCCI, E.G.R.. **Concreto de cimento Portland**. 12a ed. São Paulo: Globo, 1993, 295 p.
- ÖLMEZ, H. & HEREN, Z. **Making a pozzolanic rice-husk ash and its use in acid resistance cements**. In: MALHOTRA, V.M. (ed) International conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete. Proceedings. American concrete institute. Detroit, 1989, p. 851-861.
- PITT, N. **Process for preparation of siliceous ashes**. US Patent N^o 3959007, May, 1976.
- PONTE FILHO, F. **Gaseificadores de leito fixo: análise e modelo para otimização de projetos e pesquisas**. Centro Gráfico Federal. Brasília, 1988, 165 p.
- POWERS, C. **The properties of fresh concrete**. New York, Wiley, 1968, 664 p.
- PRISZKULNIK, S. **Aspectos reológicos do concreto fresco e sua dosagem**. In: Colóquio sobre Dosagem do Concreto. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, maio, 1977, 64 p.
- PRUDÊNCIO JR., L.R.; DAFICO, D.A. et al. **Desenvolvimento de equipamento para produção de sílica ativa de baixo teor de carbono a partir da casca de arroz**. Relatório de Pesquisa. Banco de Projetos da Construção Civil. PADCT III – CDT/AMPE. Brasil. 1999.
- RODRIGUES, P.F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. São Paulo, ABCP, 1995, 23 p.
- SAAD, M.N.A; OLIVEIRA, P.J.R; SALLES, F.M. **A influência de alguns parâmetros sobre a resistência do concreto**. Seminário sobre Controle da Resistência do Concreto. IBRACON, São Paulo, 1983, 14 p.
- SALLAS, J.; CASTILLO, P.; ROJAS, M.I.S.; VERAS, J. **Empleo de cenizas de cascaras de arroz como adiciones en morteros**. *Materiales de construcción*. Madrid, V. 36, n. 203, 1986.
- SANTAMARIA, F.S. **Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción**. Conferência pronunciada en el II Curso de Rocas Industriales. *Materiales de Construcción*. N^o 190-191. Madrid, 1983, p. 69-84.
- SANTOS, L.M. **Cálculo de concreto armado segundo a NB-1/76 e o CB/72**. Ed. Edgard Blucher, 1977.
- SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. Dissertação de Mestrado. UFSC, Florianópolis, 1997, 111 p.
- SARKAR, S.L; AİTCIN, P.C.; DJELLOULI, H. **Synergistic roles of slag and silica fume in very high-strength concrete**. *Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP*, Vol. 12, N^o 1, summer, 1990, p. 32-37.

- SARKAR, S.L. **The importance of microstructure in evaluating concrete.** Proceedings: Advances in Concrete Technology. CANMET. Ottawa, Canada, 1992, p. 123-158.
- SENSALE, R. & DAL MOLIN, D.C.C. **Study of influence of rice-husk ash on compressive strength of concrete at different ages.** SP 186-13. Proceedings: High-Performance Concrete. Performance and Quality of Concrete Structures. Second CANMET/ACI International Conference. Gramado, Brazil, 1999, p. 213-224.
- SILVEIRA, A.A. & RUARO, P. **A adição de cinza de casca de arroz em concretos: Estudo da influência do tipo de cinza na resistência à compressão e na microestrutura do concreto.** Seminário da disciplina de novos materiais. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1995.
- SMITH, R.G. **Rice husk ash cement small scale production for low cost housing.** In: International conference on lowcost housing for developing countries. Roorkee, India, 1984. Proceedings. Roorke, Central Building Research Institute, p. 887-895.
- SOBRAL, H.S. **Propriedades do concreto fresco.** ABCP. São Paulo, 1971, 14 p.
- _____. **A generalização das técnicas de dosagem: método de Powers.** In: COLÓQUIO SOBRE DOSAGEM DO CONCRETO, São Paulo, 1977. Anais. São Paulo, IBRACON, 1977, 23 p.
- _____. **Reologia e trabalhabilidade dos concretos.** 2a edição. Rev Atual. ABCP. São Paulo, 1990, 84 p.
- SUGITA, S., SHOYA, M.^a, TOKUDA, H. **Evaluation of pozzolanic activity of rice husk ash.** In: MALHOTRA, V.M. (ed)) International conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete. Proceedings. American concrete institute. Detroit, 1992, p. 495-512.
- SUGITA, S. **Method of producing active rice husk ash.** USA Patent Nº 5329867. July, 1994.
- SWAMY, R.N. **High strength concrete: material properties and structural behavior.** High strength concrete. Ed. H.G. Russell, ACI, ACI Publi., SP-87, 1985, p. 119-146.
- TANGO, C.E.S. **Contribuição ao estudo da resistência à compressão de cimentos e concretos.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1983, 149 p.
- TORALLES CARBONARI, B.M.; GETTU, R.; AGUILLÓ, L. **Produção e controle de concretos de alto desempenho e alta resistência: alguns aspectos relevantes.** VII Encontro Nacional de tecnologia do Ambiente Construído. ENTAC 98. Florianópolis, 1998, p. 55-62.
- TUTSEK, A. & BARTHA, P. **Method of producing low-carbon white husk ash.** United States Patent. No 4.049.464. EUA, 1977.
- USP - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica. **Qualidade das estruturas de concreto armado.** São Paulo, 1987.

- URIARTT, A. **Notas sobre controle da resistência e condições de aceitação do concreto conforme a NB-1/78.** Engenharia, n. 18, 1982, p. 15-56.
- YANG, S. , ZHOONGZI, X., MINGSHU, T. **Improving the structure of the interfacial zone and its influence on long-term behavior of mortars.** Materials and Structures. RILEM. Vol. 31, 1998, p. 230-234
- WORRAL, W.E. **Clays and ceramic raw materials.** John Wiley & Sons, 1th Edition, New York, 1975.